



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento Teoría de la Señal y Comunicaciones

TRABAJO FIN DE GRADO

SIMULACIÓN DEL ENLACE DESCENDENTE DE GALILEO

Autor: Miguel Serna Agudo

Tutor: Víctor Pedro Gil Jiménez

Leganés, Junio 2015



AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar las gracias a mis padres, Luis y Guadalupe, y a mi hermana Isabel, que me han apoyado en este periodo que supone el fin de una etapa importante en mi vida.

A mis amigos que me han animado y han aguantado mi ausencia en los fines de semana durante la realización de este proyecto.

A mi tutor, Víctor Pedro Gil, por haberme planteado este tema, orientado y ayudado siempre que tenía alguna duda con respecto al trabajo.

Y gracias a todos mis compañeros de carrera que me han acompañado estos cuatro años, en especial a Elena Rodríguez, por ser mi compañera en la mayoría de las prácticas grupales y con la que me he entendido bien y he estado a la par en gran parte de la carrera.

RESUMEN

Este documento es un estudio sobre los elementos necesarios para generar las diferentes señales de navegación del sistema Galileo, así como la simulación de las mismas usando la herramienta Matlab.

Como punto de partida se realiza una descripción de los GNSS (*Global Navigation Satellite System*) donde se detallan aspectos como las aplicaciones que tienen, en qué grado de implementación están actualmente: operativos o en desarrollo. Luego se centra en el sistema Galileo para exponer en qué consiste, qué servicios ofrecerá, las bandas de frecuencia en las que va a operar y las señales utilizadas.

Una vez se ha introducido el sistema Galileo de una forma general, se explican aspectos más técnicos: las modulaciones usadas, los códigos que se generan para poder transmitir cada una de las señales de dicho sistema (ver referencia [\[1\]](#)) y en qué consisten cada uno de sus componentes (canales de información y canales de control).

Después se describen cada una de las señales transmitidas por el sistema, para qué servicios de los mostrados con anterioridad serán necesarias, así como su esquema de multiplexación y sus parámetros (ver referencia [\[1\]](#)).

Para finalizar, se implementa el código necesario para la generación y representación, en ausencia de ruido o interferencias, de estas señales usando el lenguaje de programación Matlab y se comentan los resultados obtenidos.

Como conclusión, se comprueba que los objetivos planteados en el proyecto quedan cubiertos y se da una valoración personal del mismo.

ABSTRACT

This document is a study about the necessary elements to generate the different navigation signals of the system Galileo, as well as the simulation of them using Matlab.

As a starting point a description about the GNSS (Global Navigation Satellite System) is realized which specifies aspects like their applications, what is their grade of implementation currently: working or in development. Later, it focus on the system Galileo showing what this consist in, what services it will offer, what bands and signals it will use, etc.

Once the system Galileo has been introduced by a general way, it explains aspects more technical: the used modulations, the codes that are generated to be able to transmit each one of the signals of this system (to see reference [\[1\]](#)) and what consist in each one of their components (information channels and pilot channels).

Later it describes each one of the signals transmitted by the system, also what of the services shown previously they will be necessary, as well as its scheme of multiplexing and its parameters (to see reference [\[1\]](#)).

Finally, the necessary code, for the generation and the representation, in absence of noise or interferences, of these signals using the programming language Matlab is implemented and it comments the obtained results.

As a conclusion, it verifies the objectives planned in this project have been reached and a personal valuation of it is given.

ÍNDICE:

LISTA DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
ACRÓNIMOS.....	9
ENGLISH SUMMARY.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Motivación.....	17
1.2. Objetivos.....	17
2. Las GNSS y el sistema Galileo.....	19
2.1. GNSS.....	19
2.2. El sistema Galileo.....	20
2.3. Plan de frecuencias.....	24
2.3.1. Bandas de frecuencia.....	24
2.3.2. Frecuencias portadoras y anchos de banda en recepción.....	25
2.4. Modulaciones usadas en el sistema Galileo.....	26
2.4.1. Modulación BPSK (<i>Binary Phase Shift Keying</i>).....	26
2.4.2. Modulación BOC (<i>Binary Offset Carrier</i>).....	30
2.4.2.1. Análisis espectral de BOC.....	31
2.4.2.2. AltBOC.....	35
2.4.2.3. Función de auto-correlación de BOC.....	39
2.4.2.4. CASM (Coherent Adaptive Sub-Carrier Modulation).....	42
2.5. Códigos de transmisión del sistema Galileo.....	51
2.6. Códigos primarios.....	51
2.7. Códigos secundarios.....	52
2.8. Asignación de códigos.....	53
2.8.1. <i>Ranging codes</i> para E5.....	54
2.8.2. <i>Ranging codes</i> para E6.....	54
2.8.3. <i>Ranging codes</i> para L1-E1.....	55
2.9. Generación de la señal.....	55
2.9.1. Señal E5.....	57
2.9.2. Señal E6.....	64



2.9.3. Señal E1.....	68
2.9.4. Señal L1.	73
3. Estado del arte.	77
4. Aspectos de Matlab.	80
5. Resultados.....	83
6. Conclusiones.	88
7. Planificación y presupuesto.	89
7.1. Planificación.....	89
7.2. Presupuesto.....	90
7.2.1. Costes de personal.....	90
7.2.2. Costes de equipos.....	91
7.2.3. Otros costes directos del proyecto.	92
7.2.4. Coste total del proyecto.....	92
8. Trabajos futuros.....	93
9. Referencias.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Plan de frecuencias de Galileo. [6].	25
Figura 2.	Esquema de una señal modulada con BOC. [7].	34
Figura 3.	DSP señal BOC(10,5). [4].	35
Figura 4.	DSP señal AltBOC(10,10). [8].	42
Figura 5.	Constelación CASM (<i>hexaphase</i>). [5].	50
Figura 6.	Esquema de codificación CDMA (simplificada). [1].	53
Figura 7.	Esquema de multiplexación de la señal E5. [1].	57
Figura 8.	Componentes de la señal E5. [1].	58
Figura 9.	Constelación 8-PSK (señal E5). [1].	59
Figura 10.	Expresión de la señal E5. [1].	60
Figura 11.	Espectro de las señales de Galileo (banda E5). [3].	62
Figura 12.	DSP de la señal E5.	64
Figura 13.	Esquema de multiplexación de la señal E6. [1].	65
Figura 14.	Espectro de las señales de Galileo (banda E6). [3].	66
Figura 15.	DSP de la señal E6.	68
Figura 16.	Esquema de multiplexación de la señal E1. [1].	69
Figura 17.	Espectro de las señales de Galileo (banda E1/L1). [3].	71
Figura 18.	DSP de la señal E1.	73
Figura 19.	Esquema de multiplexación de la señal L1. [1].	74
Figura 20.	DSP señal L1.	75
Figura 21.	Señales de navegación.	76
Figura 22.	Elementos del sistema simulados por N-FUELS. [10].	78
Figura 23.	GUI del programa N-FUELS. [10].	78
Figura 24.	DSP de la señal E1.	83
Figura 25.	DSP señal L1.	84
Figura 26.	DSP de la señal E5.	85
Figura 27.	DSP de la señal E6.	86
Figura 28.	Señales de navegación.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Frecuencias portadoras y anchos de banda en recepción. [6].....	26
Tabla 2.	Parámetros usados para la generación de las señales. [1].	56
Tabla 3.	Coeficientes de la subportadora AltBOC. [1].	61
Tabla 4.	Características técnicas de la señal E5. [3].	63
Tabla 5.	Características técnicas de la señal E6. [3].	67
Tabla 6.	Características técnicas de la señal E1. [3].	72
Tabla 7.	Diagrama de Gantt del proyecto.	89
Tabla 8.	Costes de personal.....	90
Tabla 9.	Costes de equipos.	91
Tabla 10.	Otros costes directos del proyecto.	92
Tabla 11.	Coste total del proyecto.....	92



ACRÓNIMOS.

ACF	Autocorrelation Function
AltBOC	Alternate Binary Offset Carrier
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Service
BOC	Binary Offset Carrier
BOCcos	Binary Offset Carrier with cosine sub-carrier
BOCsin	Binary Offset Carrier with sine sub-carrier
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CASM	Coherent Adaptative Sub-carrier Modulation
CBOC	Composite Binary Offset Carrier
CDMA	Code Division Multiple Access
C/NAV	Commercial navigation message
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
F/NAV	Freely accessible navigation message
GLONASS	GLObal'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
I/NAV	Integrity navigation message
LFSR	Linear Feedback Shift Register



LSB	Least Significant Bit
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MSB	Most Significant Bit
NRZ	No-Return to Zero
PSK-R	Phase Shift Keying-Rectangular
PSD	Power Spectral Density
PRS	Public Regulated Service
RNSS	Radio Navigation Satellite System

ENGLISH SUMMARY.

This document carries out a study about the different elements necessary to generate the different navigation signals used in the System Galileo. Moreover, it contains the simulation of these signals implemented in Matlab language.

As a starting point, we make a description about the Global Navigation Satellite System's (GNSS). These systems are composed by a constellation of several satellites which send useful information to navigational information for so many applications, as they can be search and rescue, aerial and marine transport, positioning and location, geodesy, navigation, military uses, etc. Nowadays, there are some GNSS in development, like the System Galileo which we will speak about later. The System Galileo is developed by Europe initially for civil uses and with greater benefits than GPS (Global Positioning System) and GLONASS (*GLObal'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*). However, the System Galileo will be interoperable with both. The signals transmitted by the System Galileo will be included in the bands E5, E6 and E1-L1. The system offers a series of services:

- Open service:

It allows to any user equipped with a receiver, by free and without no authorization, obtaining the signals that provide precise information of time and positioning.

- Safety-of-Life service:

It will be used for the most of the applications of transport where the human life could be put in danger if the benefit of the services of the radionavigation system were degraded without notification in real time.

- Commercial service:

It will be oriented to applications of market which require a superior level of benefits that those that the open service offers. It will offer services of value added in exchange for the payment.

- Public regulated service:

“Robust” service and of controlled access for governmental applications. Service PRS (Public Regulated Service) will be used by users such as the police and the customs.

- Search and rescue service:

It will offer important improvements to the current search and rescue service.

Once the system to study has been introduced, we will focus on aspects more technical, since the final objective of this work is the simulation of the different signals from Galileo navigation system.

We will begin speaking of the different modulations used in the System Galileo. Since the information is transported making use of a carrier wave, it is necessary to use any kind of modulation, which usually is different depending on the signal to generate. Therefore, the modulations used by the System Galileo are the following ones:

- BPSK (Binary Phase-shift Keying):

Modulation BPSK is characterized by having only two different symbols (+1, - 1) for bit 0 and bit 1, respectively.

This modulation is used in the generation of the E6 signal.

- BOC (Binary Offset Carrier):

The modulation standard BOC is the modulation of a square subcarrier that consists of multiplying a signal $s(t)$ with a square subcarrier of frequency f_s which divides the spectrum of the signal in two parts, located in the left and right side of the carrier frequency.

It's used along with a variant called CBOC (Composite BOC) to modulate the E1 signal.

- AltBOC (Alternative BOC):

AltBOC is a variant of the signal BOC. The idea of the AltBOC modulation is to make the same process as in BOC but multiplying the signal in baseband by a complex rectangular subcarrier. The scheme of the AltBOC modulation has as objective generate a single subcarrier signal taking a similar source codification as used in the BOC modulation. The process allows to keep the simplicity of the BOC implementation and a constant amplitude that simultaneously allows the differentiation of the lobe.

It is used to multiplex the information of the E5 signal.

- CASM (Coherent Adaptative Sub-carrier Modulation):

CASM modulation is a particular case of the PSK/PM (Phase-shift keying) and is chosen to transmit since it keeps a constant amplitude of the signal, so that it is possible to use saturated amplifiers with a limited distortion of the signal.

In addition it used the access technique CDMA (Code Division Multiple Access) for all the signals. In order to create the codification CDMA, the ranging codes are needed. These codes consist of a modulation of two types of code: a primary code modulated by a secondary code creating the sequence of ranging. A ranging code is allocated to each signal component and its different parameters which depend on the length (in time, in chips and in the number of LFSR's used), the chips rate and the symbol rate.

Both codes can be implemented either by "memory codes" or "register-based codes". Memory codes, also called "optimized pseudo-noise sequences", are predefined codes that need to be stored in memory because there is no systematic generation possible. Register-based codes are obtained with a LFSR (which is completely defined with a tap polynomial). There are 'r' registers (which dictates the degree of the LFSR) and r+1 taps (which will produce the sequence).

Then, primary codes are "register-based codes" and secondary codes are memory codes. The XOR of both results in the ranging sequences.

With the use of the ranging codes can be generated each one of the components for each signal. The frequency bands used by the Galileo signals have been selected in the spectrum allocated by the RNSS. We can separate each signal in its different components:

- The E5 signal is formed by the components E5a and E5b and is transmitted in the frequency band 1164-1215 MHz (allocated by the RNSS). The E5 band can be used as two separated sidebands, conventionally denoted like E5A and E5B transmitting 4 different channels (E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q). Each control and information channel is the components in phase and quadrature, respectively.

The provided information consists of a message of integrity navigation (I/NAV) and is used for the Safety-of-Life service, the open service and System Galileo integrity.

- The E6 signal is formed by the components E6b and E6c and is transmitted in the frequency band 1215-1300 MHz (adjudged by the RNSS). The components of signal E6b and E6c are the control and information components, respectively.

The E6 signal is used for the commercial service generating a message of commercial navigation (C-NAV in English).

- The E1 signal de Galileo is formed by the components E1b and E1c and is transmitted in the frequency band 1559-1610 MHz (assigned by the RNSS). The components of the signals E1b and E1c are the component of information and the component of control respectively.

The E1 signal provides a message I/NAV used in the Safety-of-Life service, the open service and the System Galileo integrity.

- The L1 signal is composed by the channels (or components) L1a, L1b and L1c and are transmitted in the frequency band 1559-1610 MHz assigned by the RNSS.

L1F is a signal of open access transmitted in the L1 band composed by an information channel and a channel of control (the components



L1b and L1c respectively). The navigation data flow of signal L1F corresponds with a type of message I/NAV and contains messages of integrity and encrypted data for the commercial service of Galileo.

L1P is a signal of access restricted transmitted in the L1a channel. The navigation data flow of signal L1P corresponds with a type of message G/NAV (signal mapped by the regulated public service).

As a conclusion, it verifies the objectives planned in this project have been reached and a personal valuation of it is given.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Motivación.

El tema a tratar en este documento es un estudio del sistema Galileo. Un sistema de navegación por satélite que actualmente se encuentra aún en desarrollo: se han lanzado algunos de los satélites que darán servicio y aun se publican revisiones del estándar (la última versión del *draft* fue publicada el 30 de Junio de 2014, aunque este proyecto se realiza de acuerdo a la versión publicada en 2010. Referencia [\[1\]](#)).

Dado que es un sistema nuevo, comprobar los resultados y saber si funciona tal y como se esperaba es una tarea importante. Por eso, este proyecto realiza un estudio del sistema y la implementación de un programa usando el lenguaje Matlab que simula las diferentes señales que se transmitirán cuando esté en funcionamiento. Por lo tanto, se puede usar como validación o para analizar dichas señales con el objetivo de entender mejor este nuevo sistema.

Por lo tanto, con los argumentos antes mencionados, implementar una herramienta que ayude a asegurar el correcto funcionamiento de este nuevo sistema es una buena idea. Este proyecto se encargará desarrollarla hasta obtener ese fin.

1.2. Objetivos.

Una vez explicados los motivos de por qué puede resultar rentable la realización de este proyecto, expongo los objetivos que se buscan en el mismo:

1. Un estudio del sistema Galileo, con el fin de conocer y entender su funcionamiento, centrándose sólo en los temas relacionados con la generación de las señales de navegación utilizadas.



2. La implementación de un programa, usando el lenguaje Matlab, capaz de simular dichas señales y representarlas en el dominio de la frecuencia.

2. Las GNSS y el sistema Galileo.

2.1. GNSS.

Las *Global Navigation Satellite System* (GNSS) son sistemas formados por una constelación de satélites que, con la transmisión de señales, permiten la localización y posicionamiento en cualquier parte del globo terrestre.

De esta manera una GNSS puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas.

Actualmente existen varias GNSS:

- GPS (Americano)
- GLONASS (Ruso)

En desarrollo:

- BeiDou (Japonés)
- Galileo (Europeo)

Las GNSS proporcionan una serie de aplicaciones y servicios como búsqueda y salvamento, transporte aéreo y marítimo, posicionamiento y localización, geodesia, navegación por carretera, usos militares, etc.

2.2. El sistema Galileo.

Galileo es el sistema europeo de navegación global que dispone de una mayor precisión, una mejor calidad que el sistema GPS. A diferencia de GLONASS y GPS, Galileo se está desarrollando para uso civil. Además será interoperable con los dos sistemas de navegación mencionados anteriormente.

El sistema Galileo está formado por constelación de 30 satélites, 27 operativos y 3 de reserva, situados en una órbita media (MEO) a 23.222 kilómetros de altitud respecto al ecuador, en tres planos de 56° de inclinación, con su correspondiente infraestructura terrestre.

El segmento de control terrestre enviará comandos a los satélites usando la banda S. El servicio de navegación ofrecido por Galileo se obtiene por la transmisión, desde cada satélite, de señales en la banda L. Estas señales están formadas por los *ranging codes* y la *timing information*, esta última incluida como parte de un mensaje de navegación más general que contiene información adicional relacionada con el propio satélite, la constelación total y la integridad del servicio.

El segmento de misión terrestre determina la navegación, temporización e integridad de los datos de los mensajes de navegación y los envía a los satélites usando la banda C. La constelación del satélite será controlada por las estaciones de control y apoyada por una red de estaciones de telemetría y telecomando distribuidas por todo el mundo que usan la banda S.

La interfaz aérea de radiofrecuencia entre los segmentos espaciales y los segmentos del usuario se componen de tres señales CDMA (*Code Division Multiple Access*) independientes, llamadas E5, E6 y E1-L1, que son transmitidas de manera continua por todos los satélites de Galileo. La señal E5 está subdividida en dos señales denominadas como E5a y E5b.

El sistema Galileo ofrece a los usuarios la siguiente lista de servicios:

1) Servicio abierto (*Open Service – OS*)

Permite a cualquier usuario equipado con un receptor de manera gratuita y sin ninguna autorización la obtención de las señales del sistema Galileo (ver referencia [\[1\]](#)) que proporcionan información precisa de tiempo y posicionamiento (con un margen de error de unos pocos metros). La mayoría de los receptores recibirán las señales conjuntas de Galileo y GPS, lo que ofrecerá a los usuarios una notable mejora en la prestación de servicios en áreas urbanas.

Las frecuencias serán E5A, E5B, E1.

2) Servicio para aplicaciones críticas (*Safety-of-Life – SoL*)

Se utilizará para la mayoría de las aplicaciones de transporte donde la vida humana se podría poner en peligro si la prestación de los servicios del sistema de radionavegación se viera degradada sin notificación en tiempo real (para más información, ver referencia [\[2\]](#)).

Este servicio proporcionará la misma precisión en posicionamiento y en información precisa de tiempo que el servicio abierto. La diferencia principal es el alto nivel de integridad de cobertura mundial para las aplicaciones donde la seguridad es crítica, como por ejemplo la navegación aérea y las aplicaciones ferroviarias donde la precisión garantizada es esencial. Este servicio aumentará la seguridad, especialmente donde no hay servicios tradicionales de infraestructura terrestre. Su alcance mundial aumentará la eficiencia de las empresas que operan a escala mundial como aerolíneas y compañías marítimas transoceánicas.

El servicio estará asegurado y sus prestaciones se obtendrán mediante el uso de receptores certificados de doble frecuencia. En tales condiciones la

futura Sociedad de Explotación GALILEO (*GALILEO Operating Company* – GOC) garantizará el servicio SoL.

Las frecuencias serán E5A, E5B, E1.

3) Servicio Comercial (*Commercial Service* – CS)

Estará orientado a aplicaciones de mercado que requieren un nivel de prestaciones superior que las que ofrece el servicio abierto. Brindará servicios de valor añadido a cambio del pago de un canon.

El servicio comercial agrega dos señales a las señales de acceso abierto. Este par de señales está protegido mediante cifrado comercial, el cual será gestionado por los prestadores de servicios y la futura GOC. El acceso será controlado a nivel de receptor con claves de protección de acceso. Ejemplos de servicios típicos de valor añadido incluyen difusión de datos, garantías de servicio, servicios de información precisa de tiempo, provisión de modelos ionosféricos y señales locales de corrección diferencial para proporcionar gran precisión. Varios de estos servicios serán desarrollados por terceros — prestadores regionales—, quienes comprarán a la sociedad explotadora del sistema, *GALILEO Operating Company*, el derecho de uso de las señales comerciales.

La frecuencia será E6.

4) Servicio público regulado (*Public Regulated Service* – PRS)

Servicio "robusto" y de acceso controlado para aplicaciones gubernamentales. El servicio PRS será utilizado por usuarios tales como la policía y la aduana.

Instituciones civiles controlarán el acceso al servicio PRS cifrado cuyo ingreso por región o grupo de usuarios cumplirá las políticas de seguridad aplicables en toda Europa. Deberá estar operativo en todo momento y en cualquier circunstancia, especialmente en períodos de crisis o cuando otros servicios puedan estar interferidos intencionadamente. El PRS es un servicio independiente, en forma tal que otros servicios pueden ser denegados sin que esto afecte a la disponibilidad del servicio PRS. Una característica que destaca al servicio PRS es la robustez de su señal, lo cual lo protege contra los efectos de las interferencias intencionadas y de los intentos de emisión intencionada de una señal modificada.

Las frecuencias serán E6 y E1.

5) Servicio de búsqueda y salvamento (*Search and Rescue Service* – SAR)

Este servicio brindará importantes mejoras al sistema de Búsqueda y Salvamento (SAR) existente, como por ejemplo:

- Recepción casi en tiempo real de mensajes de socorro transmitidos desde cualquier punto de la Tierra (el tiempo medio de espera es actualmente de una hora).
- Localización precisa de alertas (pocos metros, en lugar de los 5 km actualmente especificados).
- Detección por múltiples satélites para evitar el bloqueo en condiciones de poca visibilidad de los satélites.
- Mayor disponibilidad del segmento espacial (30 satélites en órbita terrestre media que se añaden a los cuatro satélites en órbita terrestre baja y los tres satélites geoestacionarios del actual sistema).

Por otra parte Galileo introducirá nuevas funciones, tales como enlace de retorno (del operador del SAR a la baliza emisora de socorro). De esta forma, facilitará las operaciones de rescate y ayudará a reducir el índice de falsas alarmas. Este servicio se está definiendo en cooperación con los responsables del sistema COSPAS-SARSAT y sus características y operaciones se regulan bajo el control de la Organización Marítima Internacional (OMI) y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

En total, cada satélite galileo retransmitirá 10 radiofrecuencias, de la siguiente manera:

- 4 frecuencias en el rango de 1164-1215 MHz (E5A-E5B)
- 3 frecuencias en el rango de 1260-1300 MHz (E6),
- 3 frecuencias en el rango de 1559-1591 MHz (L1).

Las señales usadas en galileo están compuestas por componentes en fase y en cuadratura. En la banda E5, las señales se modulan y multiplexan con la técnica AltBOC (15,10); En la banda E6 con BPSK (5) y BOCcos (10,5); Y la banda L1 (subdividida en las bandas E1, L1 y E2) con CBOC (6,1,1/11) y BOCcos (15,2.5).

2.3. Plan de frecuencias.

2.3.1. Bandas de frecuencia.

Las señales de navegación del sistema Galileo se transmiten en cuatro bandas de frecuencia tal y como se muestra en la figura 1. Estas cuatro bandas de frecuencia son las bandas E5a, E5b, E6 and E1 y conforman el ancho de banda usado por Galileo.

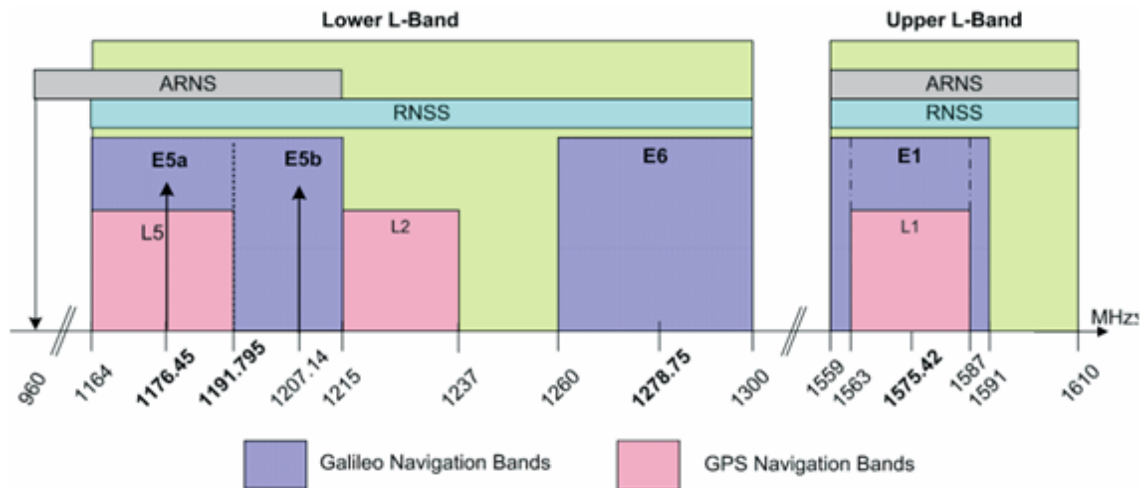


Figura 1. Plan de frecuencias de Galileo. Obtenida de la referencia [6].

Las bandas de frecuencia de Galileo han sido seleccionadas y asignadas para los *Radio Navigation Satellite Services* (RNSS) y además, las bandas E5a, E5b y E1 están incluidas en el espectro asignado para los *Aeronautical Radio Navigation Services* (ARNS), usados por los usuarios de la aviación civil, y permitiendo la utilización de aplicaciones críticas para la seguridad.

2.3.2. Frecuencias portadoras y anchos de banda en recepción.

El nombre de las señales Galileo se corresponde también con las frecuencias portadoras, mostradas en la Tabla 1. Nótese que las señales E5a y E5b forman parte de la señal E5 en su ancho de banda total. También se muestra el Ancho de Banda en Recepción para cada frecuencia portadora.

Señal	Frecuencia Portadora(MHz)	Ancho de Banda en Recepción ref.(MHz)
E1	1575.42	24.552
E6	1278.75	40.92
E5	1191.795	51.15
E5a	1176.45	20.46
E5b	1207.14	20.46

Tabla 1. Frecuencias portadoras y anchos de banda en recepción. Obtenida de la referencia [\[6\]](#).

2.4. Modulaciones usadas en el sistema Galileo.

2.4.1. Modulación BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

La modulación BPSK está caracterizada por tener solo dos símbolos (+1,-1) para el bit 0 y el bit 1 respectivamente. Su expresión general en paso banda puede ser definida como:

$$S(t) = A_c \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi ft + \varnothing_c + \theta_{i,k}) \cdot p(t - kT) \quad (1)$$

Dónde:

- A_c es la amplitud.
- \varnothing_c es el offset de la fase.
- $\theta_{i,k}$ es el símbolo binario $\{\pm 1\}$.
- $p(t)$ es el pulso conformador de duración T .
- El índice k numera los símbolos a lo largo del tiempo. En su forma teórica toma valores desde menos infinito a más infinito.
- El índice i numera que símbolo es tomado del alfabeto binario $\{\pm 1\}$ dependiendo de si $i = 0,1$.

Si (1) se desarrolla como “ $\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b)$ ”, la señal queda separada en una componente en fase y una componente en cuadratura:

$$S(t) = A_c \cdot \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \cos(\theta_k) \cdot p(t - kT)}_{i_s(t)} \cos(2\pi f t + \phi_c) - A_c \cdot \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sin(\theta_k) \cdot p(t - kT)}_{q_s(t)} \sin(2\pi f t + \phi_c)$$

De esta manera, estas componentes pueden ser expresadas usando el formato en banda base como:

$$b_s(t) = i_s(t) + j q_s(t)$$

Esto puede definirse como:

$$b_s(t) = A_c \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{j\theta_k} \cdot p(t - kT)$$

Ya que:

$$e^{j\theta_k} = \cos(\theta_k) + j \sin(\theta_k)$$

Por lo tanto la función de auto-correlación de la banda base puede ser obtenida fácilmente desde esta última expresión.

$$R_{b_s b_s(t)} = \frac{(A_c)^2}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{\theta\theta}(n) R_p(t - nT)$$

Donde:

- $R_{\theta\theta}(n)$ es la función de auto-correlación de los símbolos modulados en banda base, $e^{j\theta_k}$.
- $R_p(n)$ es la función de auto-correlación del pulso conformador $p(t)$.
- El índice n numera los símbolos a lo largo del tiempo.

Para obtener la densidad espectral de potencia (DSP o PSD en inglés), realizamos la transformada de Fourier sobre la función de auto-correlación obtenida:

$$\begin{aligned} F\{R_{b_s b_s}(t)\} &= F\left\{\frac{(A_c)^2}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{\theta\theta}(n) R_p(t - nT)\right\} \\ &= \frac{(A_c)^2}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{\theta\theta}(n) R_p(t - nT) F\{R_p(t - nT)\} \end{aligned}$$

Únicamente el factor que depende del tiempo sufre dicha transformación:

$$\begin{aligned} F\{R_p(t - nT)\} &= F\{R_p(t) \cdot \delta(t - nT)\} = F\{p(t) \cdot p(-t)^* \cdot \delta(t - nT)\} \\ &= P(f) \cdot P(-f) \cdot e^{-2\pi f n T} \end{aligned}$$

Siendo $P(f)$ la transformada de Fourier del pulso rectangular de duración T :

$$P(f) = F\{p(t)\} = T \cdot \text{sinc}(fT)$$

Como $p(t)$ es un pulso rectangular real, no se ve afectado por el conjugado. Además como $P(f)$ es una función par, $P(f) = P(-f)$. Por lo tanto, $P(f) \cdot P(-f) = |P(f)|^2$ y al no depender de n puede sacarse fuera del sumatorio:

$$S_{b_s}(f) = \frac{(A_c)^2}{T} \cdot |P(f)|^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{\theta\theta}(n) \cdot e^{-2\pi f n T}$$

La función de auto-correlación de los símbolos modulados en banda base puede definirse como la covarianza más el cuadrado de la media de los símbolos:

$$R_{\theta\theta}(n) = C_{\theta\theta}(n) + E[\theta]^2$$

Para comprobar cómo la estadística afecta a la DSP, podemos reorganizar la ecuación de la siguiente manera:

$$S_{b_s}(f) = \frac{(A_c)^2}{T} \cdot |P(f)|^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{\theta\theta}(n) \cdot e^{-2\pi f n T} + \frac{(A_c)^2}{T^2} \cdot E[\theta]^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left| P\left(\frac{n}{T}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{n}{T}\right) \quad (2)$$

Como se puede observar en (2), la función de auto-correlación y la DSP no solo depende del pulso $p(t)$, sino que además, dependen de la estadística de los símbolos. Si la media de los símbolos es diferente de 0, la DSP presenta “portadoras” que no ofrecen información provocando un uso ineficiente de la potencia.

Por el contrario si los símbolos son independientes y tienen media igual a 0 y como $C_{\theta\theta}(n) = \sigma_{\theta}^2 \cdot \delta(n)$, entonces:

$$S_{b_s}(f) = \frac{(A_c)^2 \cdot \sigma_{\theta}^2 \cdot |P(f)|^2}{T}$$

Con la DSP en banda base obtenida es fácil conocer la DSP en paso banda:

$$S_s^{PSK} = \frac{1}{4} [S_{b_s}(f - f_c) + S_{b_s}(f + f_c)] = \frac{(A_c)^2 \cdot \sigma_{\theta}^2 \cdot |P(f)|^2}{4T}$$

Donde:

$$\sigma_{\theta}^2 = E[(e^{j\theta_k})^2] - E[e^{j\theta_k}]^2 = 1 - 0 = 1$$

2.4.2. Modulación BOC (*Binary Offset Carrier*).

BOC fue diseñado con la necesidad de añadir otra señal dentro de las bandas de radiofrecuencia que ya estaban siendo usadas. En un primer momento, las modulaciones BOC fueron desarrolladas para proporcionar aislamiento espectral contra otras señales moduladas en la misma frecuencia portadora. También ofrece otras ventajas como su módulo constante y su fase binaria.

Además, desplazando la señal fuera del centro de la banda, propician una mayor precisión del código de seguimiento y resistencia a la propagación multicamino. Las modulaciones de BOC cuentan con dos parámetros de diseño, f_s y f_c , que permiten concentrar la potencia de la señal dentro de la banda asignada para reducir la interferencia con otras señales recibidas. Incluso, la redundancia presente en las bandas laterales superior e inferior ofrece ventajas para la adquisición de la señal en el receptor y la demodulación de la información. No obstante, las modulaciones BOC introducen anomalías en el código de seguimiento si la frecuencia de la

subportadora es mucho mayor que la tasa del código de extendido. También el amplio espaciado entre sub-portadoras puede limitar la coherencia espectral de la señal recibida a causa de la dispersión y otras condiciones del canal como la distorsión ionosférica.

2.4.2.1. Análisis espectral de BOC.

La expresión en banda base de la señal portadora viene dada por:

$$S(t) = e^{-j\theta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \mu_{nTs}(t - knTs - t_o) c_{Ts}(t - t_o) \quad (3)$$

Donde:

- a_k es la información del código extendido modulado. Con módulo unidad y valores de fase elegidos al azar de un alfabeto.
- c_{Ts} es la subportadora cuyo periodo es $2Ts$.
- μ_{nTs} es el símbolo del código de extendido.
- n es el número de Ts 's de la subportadora durante el cual el código extendido tiene el mismo valor.
- θ y t_o reflejan desplazamientos arbitrarios en fase y tiempo.

Puede comprobarse que cuando el código de extendido es rectangular, ésta señal portadora (3), es una PSK rectangular convencional modulando una señal periódica. La modulación BOC fue el resultado de una amplitud compleja de módulo constante al usar una subportadora cuadrada, c_{Ts} , y un símbolo de extendido rectangular, μ_{nTs} , no filtrado.

Una modulación BOC está definida por $\text{BOC}(f_s, f_c)$, donde f_s es la frecuencia de la portadora y f_c es la tasa de código:

$$f_s = \frac{1}{2T_s} \quad f_c = \frac{1}{nT_s} = \frac{2}{n}f_s$$

Tanto f_s como f_c son múltiplos de 1.023 MHz y MChip/s respectivamente.

La expresión (3) puede reescribirse, si se tiene en cuenta la paridad de n , de la siguiente forma:

- n par:

$$S_{\text{BOC}(f_s, f_c)}(t) = e^{-j\theta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k q_{nT_s}(t - knT_s - t_o)$$

- n impar:

$$S_{\text{BOC}(f_s, f_c)}(t) = e^{-j\theta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k (-1)^k q_{nT_s}(t - knT_s - t_o)$$

Con el símbolo de extendido:

$$q_{nT_s}(t) = \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^m \mu_{T_s}(t - mT_s)$$

Donde el último sumatorio son los n medios ciclos de una onda cuadrada.

Para n par, el valor medio de q_{nTs} es cero (símbolo balanceado). Cuando $n=1$ y se usa un símbolo de extendido NRZ (*Not-Return-Zero*) rectangular, resulta en una BOC $(f_c/2, f_c)$ que cuenta con los mismos parámetros de segundo orden (ACF y DSP) que una PSK-R convencional. Sin embargo, las formas de onda no son las mismas debido al -1 cuando n es impar.

Considerando que los valores binarios de la secuencia de extendido de BOC son equiprobables, independientes y linealmente distribuidos, la DSP normalizada en banda base de la modulación BOC es:

- Para n par:

$$S_{BOC(f_s, f_c)}(f) = \frac{1}{nT_s} \left(\frac{\text{sen}(\pi f T_s) \text{sen}(n \cdot \pi f T_s)}{\pi f \cos(\pi f T_s)} \right)^2$$

- Para n impar:

$$S_{BOC(f_s, f_c)}(f) = \frac{1}{nT_s} \left(\frac{\text{sen}(\pi f T_s) \cos(n \cdot \pi f T_s)}{\pi f \cos(\pi f T_s)} \right)^2 \quad (4)$$

Cuando $n=1$ se puede ver que la expresión (4) toma la forma de la DSP de una modulación PSK-R:

$$\begin{aligned} S_{BOC(f_s, f_c)}(f) &= \frac{1}{nT_s} \left(\frac{\text{sen}(\pi f T_s) \cos(n \cdot \pi f T_s)}{\pi f \cos(\pi f T_s)} \right)^2 = \frac{1}{T_s} \left(\frac{\text{sen}(\pi f T_s)}{\pi f} \right)^2 \\ &= T_s \text{sinc}^2(fT_s) = \frac{1}{f_s} \text{sinc}^2(fT_s) \end{aligned}$$

En la DSP, la suma de los lóbulos principales y los lóbulos laterales entre los lóbulos principales es igual a n , dos veces el ratio de la frecuencia de la subportadora para el ratio del código. Como una PSK convencional, la distancia entre los ceros que cruza el lóbulo es dos veces el ratio del código,

mientras que en los lóbulos laterales coincide con el ratio del código. El máximo de los lóbulos principales ocurre a frecuencias ligeramente menores que la frecuencia de la subportadora a causa de las interacciones entre las bandas laterales inferior y superior.

Ahora, para obtener una mejor aproximación y ver desde otro punto de vista en qué consiste la modulación BOC, se realiza una transformada de Fourier de la señal compuesta por los datos (una secuencia aleatoria de valores ± 1), una codificación CDMA y una subportadora cuadrada:

$$s(t) = d(t) \cdot c(t) \cdot \text{sign}(x(t))$$

Donde $x(t)$ indica si es una subportadora sinodal o cosenoidal.

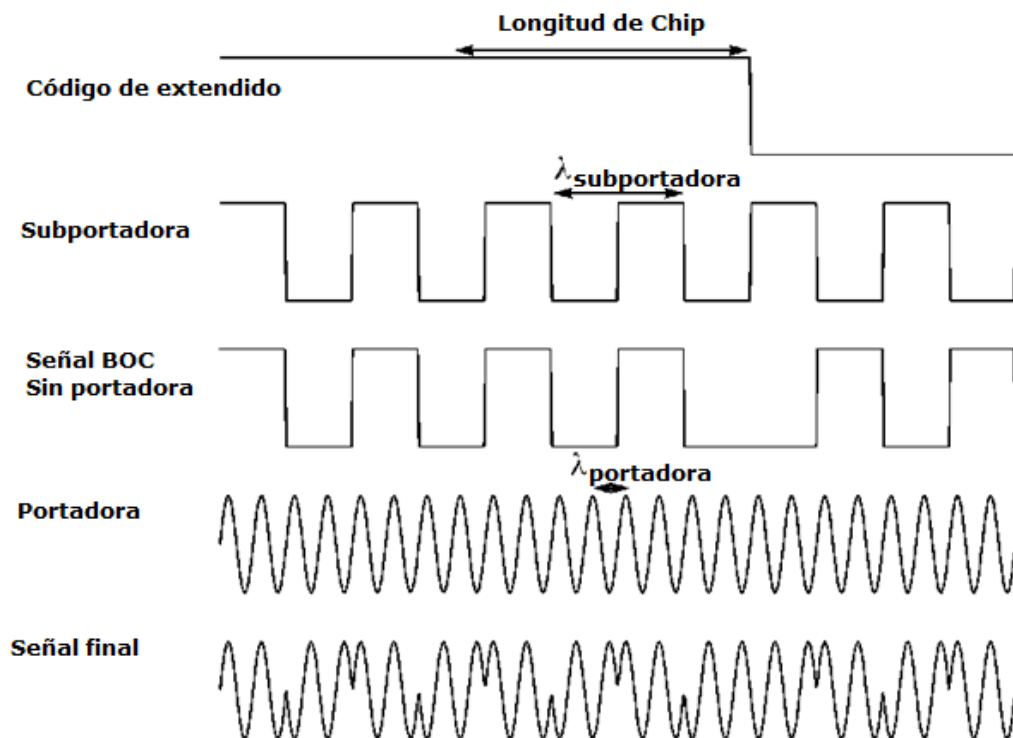


Figura 2. Esquema de una señal modulada con BOC. Obtenida de la referencia [7].

Cada una de las tres componentes anteriores tiene su propósito en esta modulación. Por ejemplo, $d(t)$ es la información modulada transmitida. La señal también puede carecer de datos y convertirse en una señal de control incluyendo únicamente el *ranging code* y la subportadora. $C(t)$ es el código de extendido, el cual expande el espectro y proporciona a la modulación las características de una modulación de espectro ensanchado. Este factor es el que más influye en el modelado del espectro. Por lo tanto, cuanto más alto sea el ratio de chip, más ancho será el lóbulo principal. Para terminar, tenemos la subportadora cuadrada. Esta forma de modulación permite asignar el espectro en una parte específica de la banda. Esto se debe a que la transformada de Fourier está formada por deltas equiespaciadas k/T_s Hz (para k impar y T_s igual al periodo de la subportadora).

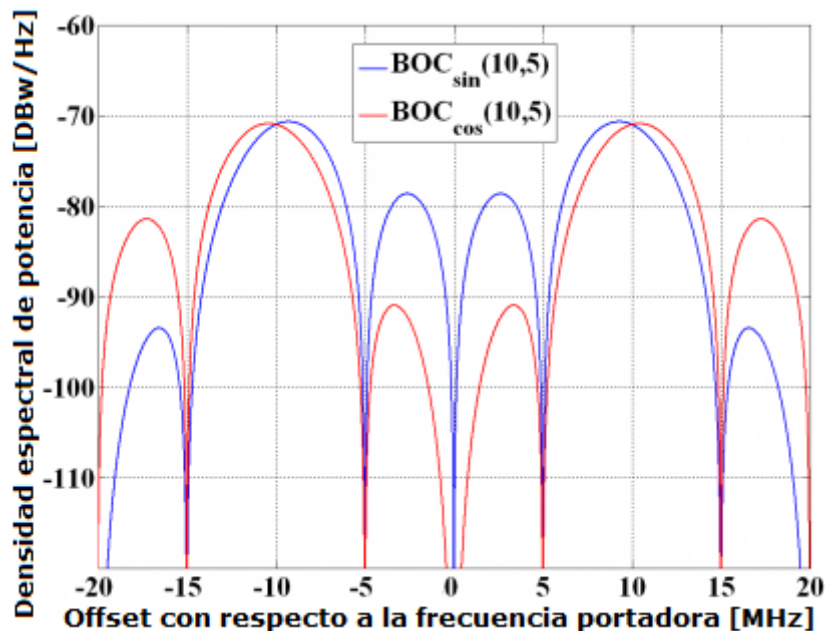


Figura 3. DSP señal BOC(10,5). Obtenida de la referencia [4].

2.4.2.2. AltBOC.

AltBOC es una técnica de modulación y multiplexación que se utiliza en la señal E5 de Galileo, como se verá más adelante. Sin embargo, para la modulación de la señal E5 se usa una versión ligeramente diferente y más compleja de esta técnica, pero entendiendo este primer modelo facilitará la comprensión de la versión real de la señal de navegación E5.

El esquema de la modulación AltBOC tiene como objetivo generar una sola señal subportadora tomando una codificación de la fuente similar a la usada en la modulación BOC. El proceso permite conservar la simplicidad de la implementación de BOC y una amplitud constante que a la vez permite la diferenciación del lóbulo.

La modulación BOC estándar, como se mostró anteriormente, es la modulación de una subportadora cuadrada que consiste en multiplicar una señal $s(t)$ con una subportadora cuadrada de frecuencia f_s la cual divide el espectro de la señal en dos partes, localizadas en el lado izquierdo y derecho de la frecuencia portadora.

La idea de la modulación AltBOC es realizar el mismo proceso pero multiplicando la señal en banda base por una subportadora rectangular “compleja”:

$$r_{cs}(t) = \text{sign}(\cos(2\pi f_s t)) + j \cdot \text{sign}(\sin(2\pi f_s t)) = c_r(t) + j \cdot s_r(t)$$

De esta forma, el espectro de la señal no se divide, sino que se desplaza a frecuencias más altas. Una señal $s(t)$ diferente, que contenga un *ranging code* y unos datos de navegación distintos, puede ser usado para desplazar a un rango de frecuencias más alto o más bajo. Por este principio los lóbulos laterales de una señal BOC pueden llevar una información diferente.

La señal AltBOC puede ser expresada como:

$$s(t) = C_a(t) \cdot r_{cs}(t) + C_b(t) \cdot r_{\check{s}}(t) \quad (5)$$

Donde:

- $C_a(t)$ es un código de ruido pseudoaleatorio (PNR) para el canal a.
- $C_b(t)$ es un código de ruido pseudoaleatorio (PNR) para el canal b.

- r_{cs} es la subportadora compleja rectangular definida arriba.

Dado que las secuencias $C_a(t)$ y $C_b(t)$ pueden asumir sólo los valores de ± 1 , es posible reescribir la señal $s(t)$ como:

$$s(t) = 2 \cdot e^{jk\frac{\pi}{2}} \quad k \in \{1, 2, 3, 4\}$$

Así, puede comprobarse que la amplitud del canal en fase y del canal en cuadratura es constante.

Las limitaciones de este concepto básico residen en el hecho de que cada señal en cada banda lateral debe ser una BPSK y no una QPSK, para incluir canales de control, a causa de que algunas porciones de la señal AltBOC tienen potencia nula.

Por lo tanto, si se desea añadir los canales de control, la expresión (5) puede dividirse en sus componentes en fase (canales de datos) y en cuadratura (canales de control):

$$s(t) = C_a(t) \cdot r_{cs}(t) + C_b(t) \cdot r_{\check{c}s}(t) + j \cdot [C_a'(t) \cdot r_{cs}(t) + C_b'(t) \cdot r_{\check{c}s}(t)] \quad (6)$$

Donde:

- $C_a(t)$ son los datos multiplicados por el código PNR para el canal a.
- $C_b(t)$ son los datos multiplicados por el código PNR para el canal b.
- r_{cs} es la subportadora compleja rectangular.
- $C_a'(t)$ es el canal de control (sólo código PNR) para el canal a.
- $C_b'(t)$ es el canal de control (sólo código PNR) para el canal b.

De nuevo, si la expresión de (6) se desarrolla siguiendo los mismos pasos que antes, puede reescribirse de la siguiente manera:

$$s(t) = [(C_a(t) + C_b(t)) \cdot cr(t) - (C'_a(t) - C'_b(t)) \cdot Sr(t)] + j \cdot [(C'_a(t) + C'_b(t)) \cdot crt + C_a t - C_b t Srt] \quad (7)$$

Esta señal, (7), puede tomar 9 valores diferentes, que pueden ser escritos con la siguiente fórmula:

$$s(t) = A_k \cdot e^{jk\frac{\pi}{4}} \quad k \in \{0,1,2,3,4,5,6,7,9\}$$

Con:

$$\begin{aligned} A_k &= 0 && \text{para } k=0 \\ A_k &= 2\sqrt{2} && \text{para } k \text{ impar} \\ A_k &= 4 && \text{para } k \text{ par} \end{aligned}$$

Puede comprobarse claramente que la modulación resultante no será una modulación de amplitud constante. Por este motivo, la modulación AltBOC usada por Galileo ha sido modificada introduciendo dos subportadoras diferentes y los productos de las componentes con el objetivo de obtener una señal que corresponda a una constelación 8-PSK (amplitud constante) lo cual es muy importante para satélites con amplificadores de alta potencia.

Esta última forma de $s(t)$ es muy importante porque así es como está compuesta la señal E5. Como se verá en el apartado de la generación de las señales de navegación (también desde la referencia [\[1\]](#)), la señal E5 se definirá como la suma de cuatro términos, donde cada par de términos serán expresados como la $s(t)$ anteriormente mencionada.

2.4.2.3. Función de auto-correlación de BOC.

Dado que la función de autocorrelación es el punto más importante para la adquisición de la señal en el receptor. En este apartado se analizará cómo obtener la función de autocorrelación de una señal BOC, teniendo en cuenta que es más sencillo realizar la transformada de Fourier inversa partiendo de la DSP. Como ejemplo, se obtendrá la función de autocorrelación de la BOC(1,1) a partir de su DSP:

$$f_s = \frac{1}{2T_s} = 1 \quad f_c = \frac{1}{nT_s} = 1 \quad ; \quad T_s = \frac{1}{2} \quad n = 2$$

$$\begin{aligned} S_{BOC(1,1)}(f) &= \left(\frac{\text{sen}\left(\frac{\pi f}{2}\right) \cdot \text{sen}(\pi f)}{\pi f \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{2}\right)} \right)^2 = \left(\frac{\text{sen}\left(\frac{\pi f}{2}\right) \cdot 2\text{sen}(\pi f) \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{2}\right)}{\pi f \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{2}\right)} \right)^2 \\ &= \left(\frac{2\text{sen}^2\left(\frac{\pi f}{2}\right)}{\pi f} \right)^2 = \frac{16}{4\pi^2 f^2} \text{sen}^4\left(\frac{\pi f}{2}\right) \\ &= \frac{2}{4\pi^2 f^2} \cdot (\cos(2\pi f) - 4\cos(\pi f) + 3) \\ &= \frac{2}{4\pi^2 f^2} \cdot \left(3 + \cos(2\pi f) - 4\cos\left(\frac{2\pi f}{2}\right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde $\text{sen}^4(x) = \frac{3}{8} + \frac{\cos(4x)}{8} - \frac{\cos(2x)}{2}$

A continuación, para realizar la transformación inversa de la expresión (8), se toman como funciones de referencia, $G_k(f)$ y $S_k(f)$:

$$G_k(f) = \frac{\cos(2\pi f k)}{4\pi^2 f^2} \quad S_k(f) = \frac{1}{4k^2 \pi^2 f^2}$$

Así, la función de autocorrelación será:

$$g_k(t) = F^{-1}\left\{\frac{1}{4\pi^2 f^2}\right\} \cdot F^{-1}\{\cos(2\pi f k)\} = \frac{-t \cdot \text{sign}(t)}{2} \cdot \frac{\delta(t-k) + \delta(t+k)}{2}$$

$$= \frac{-(t-k)\text{sign}(t-k) - (t+k)\text{sign}(t+k)}{4} \quad (9)$$

$$s_k(t) = F^{-1}\left\{\frac{1}{4k^2\pi^2 f^2}\right\} = \frac{-t \cdot \text{sign}(t)}{2k^2} \quad (10)$$

Una vez definidas (9) y (10), se puede expresar la función de autocorrelación de BOC(1,1) como una combinación lineal de las dos funciones anteriores:

$$ACF_{BOC(1,1)}(t) = 6 \cdot s_1(t) + 2 \cdot g_1(t) - 8 \cdot g_{\frac{1}{2}}(t)$$

Cuando la señal BOC es más compleja, como por ejemplo BOC(10,5), el método para obtener la función de autocorrelación es analíticamente similar al usado para BOC(1,1), sin embargo, las funciones para la transformación de Fourier inversa son más complicadas. En el caso de una BOC(10,5), el procedimiento a seguir para obtener su función de autocorrelación sería el siguiente:

$$f_s = \frac{1}{2T_s} = 10 \quad f_c = \frac{1}{nT_s} = 5 \quad ; \quad T_s = \frac{1}{20} \quad n = 4$$

$$S_{BOC(10,5)}(f) = f_c \left(\frac{\text{sen}(\pi f T_s) \cdot \text{sen}(4\pi f T_s)}{\pi f \cdot \cos(\pi f T_s)} \right)^2$$

El factor que complica la transformación inversa es el $\cos(x)$ en el cociente, ya que no se trata de una transformación inversa directa. Por lo tanto, para deshacerse de la función coseno es necesario aplicar identidades trigonométricas. En concreto, puede usarse la identidad “ $\sin(2x)=2\sin(x)\cos(x)$ ” tantas veces como sean necesarias:

$$\begin{aligned}\sin^2(4\pi fTs) &= (2\sin(2\pi fTs) \cos(2\pi fTs))^2 = \\ (2 \cdot 2 \cdot \sin(\pi fTs) \cos(\pi fTs) \cos(2\pi fTs))^2 &= 16 \cdot \sin^2(\pi fTs) \cdot \cos^2(\pi fTs) \cdot \\ \cos^2(2\pi fTs)\end{aligned}$$

De esta manera, su DSP puede escribirse como:

$$S_{BOC(10,5)}(f) = \frac{16f_c}{\pi^2 f^2} \sin^4(\pi fTs) \cos^2(2\pi fTs)$$

Después de esto, puede desarrollarse la senoide como antes, o intentar reescribir ambas funciones trigonométricas con los mismos argumentos, ya que el argumento del coseno es el doble que el del seno. Aplicando la identidad trigonométrica “ $\cos^2(2x) = 1 - \sin^2(2x)$ ”, la expresión queda de la siguiente forma:

$$\cos^2(2x) = 1 - \sin^2(2x) = 1 - 4\sin^2(x)\cos^2(x)$$

Por consiguiente:

$$S_{BOC(10,5)}(f) = \frac{16f_c}{\pi^2 f^2} \sin^4(\pi fTs) - 4\sin^6(\pi fTs) \cos^2(\pi fTs)$$

Llegados a este punto, se puede realizar la transformada inversa de todas las funciones trigonométricas obteniendo así la función de autocorrelación de BOC(10,5).

También se puede abordar el problema desde otro punto de vista (menos matemático y más práctico), teniendo en cuenta que lo que queremos obtener es la función de autocorrelación de una subportadora binaria cuadrada. Por lo tanto, es suficiente con simular las formas de onda del seno y del coseno con las características de la BOC(f_s, f_c) usando los parámetros adecuados, tales como el número de muestras (frecuencia de muestreo). El punto más importante en esta simulación es el parámetro n , el número de medios periodos en un chip.

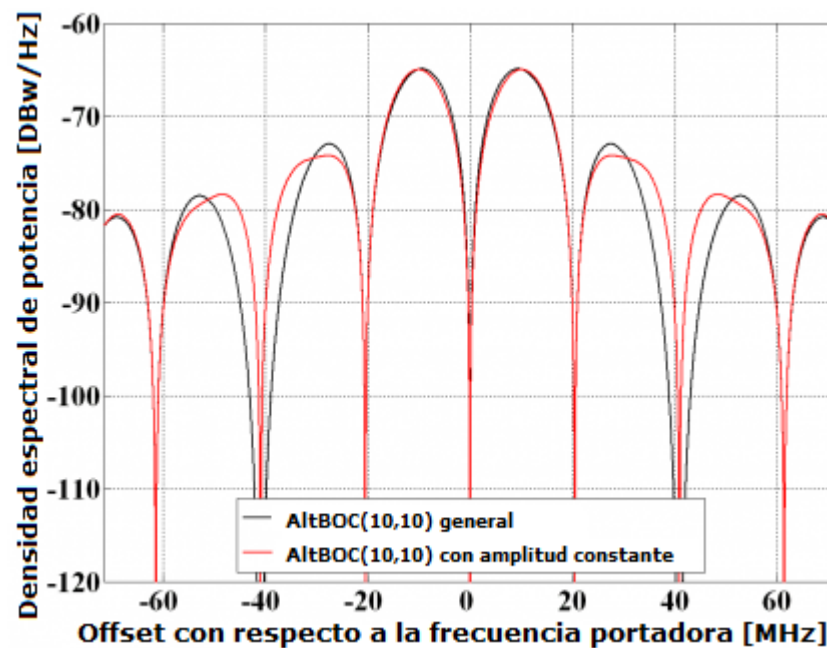


Figura 4.DSP señal AltBOC(10,10). Obtenida de la referencia [8].

2.4.2.4. CASM (Coherent Adaptive Sub-Carrier Modulation).

Las limitaciones espectrales en los sistemas de navegación por satélite requieren que varias señales de navegación de difusión del sistema Galileo deban combinarse y utilizar modulaciones con un ancho de banda eficiente. En la banda L1, una de las preguntas más importantes es como combinar todas las señales del servicio abierto y del servicio público regulado al nivel del payload, manteniendo un buen rendimiento en recepción. La modulación CASM, un caso particular de la PSK/PM (*phase-shifted-keyed/phase modulation*), es elegida para transmitir estas señales dado que es una modulación de amplitud constante, así es posible usar amplificadores saturados con una limitada distorsión de la señal. Esta modulación también

es usada como referencia en la banda E6 para la transmisión de 3 canales y los servicios asociados a la misma frecuencia portadora. En la banda E5, la modulación debe combinar dos servicios diferentes en una misma señal, conservando la simplicidad de la implementación de BOC.

Dentro de la banda E5, el objetivo de esta modulación es multiplexar 3 tipos de servicios diferentes (el servicio abierto, el servicio comercial y el servicio para aplicaciones críticas), incluidas en dos señales BOC (se usa AltBOC en la transmisión de la señal E5). En la banda L1, el objetivo es combinar 3 señales diferentes asociadas a dos servicios diferentes (dos señales para el servicio abierto y una para el servicio público regulado) en una señal de fase modulada. Además, en este caso, CASM ofrece la mejor eficiencia energética de los satélites en general. En la banda E6, el esquema de la modulación es similar al usado en la banda L1.

La fórmula usada para esta modulación consiste en un coseno cuyo argumento contiene la frecuencia portadora, en los diferentes canales a multiplexar y en una fase aleatoria. Como el coseno está delimitado por un rango de ± 1 , la señal modulada estará delimitada por la amplitud asignada. Esto no significa que la señal tendrá una amplitud constante, pero tomando los valores adecuados será fácil conseguir esta característica.

Por lo tanto la fórmula usada para CASM es:

$$s(t) = \sqrt{2P} \cdot \cos(2\pi f_c t + \theta(t) + \varphi)$$

Donde:

- P es la potencia promedio total.
- f_c la frecuencia portadora.
- $\theta(t)$ es la fase de modulación.
- φ es la fase aleatoria.

Y, para el caso del sistema Galileo, la $\theta(t)$ queda definida como:

$$\theta(t) = \beta_1 s_1(t) + \sum_{n=2}^N \beta_n s_1(t) \cdot s_n(t)$$

Donde:

- N es el número de señales a multiplexar.
- β_n es el índice de modulación.
- $s_n(t) = \pm 1$.

El valor del índice de modulación, β_n , determina la potencia asignada para cada componente de la señal.

A continuación se mostrará un ejemplo con una señal de la banda L1 para analizar la modulación CASM. Como se dijo con anterioridad, en L1, se multiplexan tres señales en una misma portadora, por lo tanto, una de ellas estará en la componente en cuadratura, $s_1(t)$, y las otras dos restantes estarán en las componentes en fase, $s_2(t)$ y $s_3(t)$. De esta forma la fórmula general para L1 queda como sigue:

$$s(t) = \sqrt{2P} \cdot \cos \left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{2} s_1(t) + \beta_2 s_1(t) \cdot s_2(t) + \beta_3 s_1(t) \cdot s_3(t) + \varphi \right) \quad (11)$$

Donde β_1 se considera $-\frac{\pi}{2}$ porque de esta manera $s_1(t)$ está en cuadratura con las otras dos señales. Luego, si se desarrolla (11) aplicando expansiones trigonométricas se obtiene:

$$s(t) = \sqrt{2P} \cdot [\cos(2\pi f_c t + \varphi) \cdot \cos(Q) - \sin(2\pi f_c t + \varphi) \cdot \sin(Q)]$$

Siendo $Q = -\frac{\pi}{2}s_1(t) + \beta_2s_1(t) \cdot s_2(t) + \beta_3s_1(t) \cdot s_3(t)$

Ahora, al desarrollar el seno y el coseno con argumento Q sabiendo que las señales $s_n(t)$ son binarias (toman valores de ± 1):

$$\cos\left(-\frac{\pi}{2} + \beta_2 + \beta_3\right) = \text{sen}(\beta_2 + \beta_3) = \text{sen}(\beta_2) \cos(\beta_3) + \text{sen}(\beta_3) \cos(\beta_2)$$

$$\text{sen}\left(-\frac{\pi}{2} + \beta_2 + \beta_3\right) = -\cos(\beta_2 + \beta_3) = -\cos(\beta_2) \cos(\beta_3) + \text{sen}(\beta_2)\text{sen}(\beta_3)$$

Juntando todas las expresiones y agregando los canales binarios, se consigue:

$$\begin{aligned} s(t) = \sqrt{2P} \cdot [& [s_2(t)\text{sen}(\beta_2) \cos(\beta_3) + s_3(t)\text{sen}(\beta_3) \cos(\beta_2)] \cdot \cos(2\pi f_c t + \varphi) \\ & + [s_1(t) \cos(\beta_2) \cos(\beta_3) - s_1(t)s_2(t)s_3(t)\text{sen}(\beta_2)\text{sen}(\beta_3)] \\ & \cdot \text{sen}(2\pi f_c t + \varphi)] \end{aligned} \quad (12)$$

Si se dividen las componentes en fase y en cuadratura a partir de esta expresión en paso banda (12), se puede reescribir como banda base:

$$\begin{aligned} s(t) = \sqrt{2P} \cdot [& [s_2(t)\text{sen}(\beta_2) \cos(\beta_3) + s_3(t)\text{sen}(\beta_3) \cos(\beta_2)] + j \\ & \cdot [s_1(t) \cos(\beta_2) \cos(\beta_3) - s_1(t)s_2(t)s_3(t)\text{sen}(\beta_2)\text{sen}(\beta_3)]] \end{aligned}$$

Ahora, teniendo en cuenta la potencia de cada componente (sabido que la potencia de un seno o de un coseno es la amplitud al cuadrado dividido entre 2):

$$P_1 = P \cdot \cos^2(\beta_2)\cos^2(\beta_3)$$

$$P_2 = P \cdot \text{sen}^2(\beta_2)\cos^2(\beta_3)$$

$$P_3 = P \cdot \text{sen}^2(\beta_3)\cos^2(\beta_2)$$

$$P_{im} = P \cdot \text{sen}^2(\beta_2)\text{sen}^2(\beta_3)$$

Como puede verse, es necesario evitar la gran cantidad de potencia disponible que se pierde en la componente P_{im} (interferencia entre señales). Incluso, para que las componentes en fase y en cuadratura tengan la misma potencia, son necesarias una serie de condiciones para establecer los parámetros adecuados. Si lo anterior se cumple, P_1 corresponderá al 50% de la potencia y P_2 y P_3 , serán un 25% de ésta cada una:

$$\begin{cases} P_1 = P \cdot \cos^2(\beta_2) \cos^2(\beta_3) = 2 \cdot P \cdot \sin^2(\beta_2) \cdot \cos^2(\beta_3) \\ P_2 = P_3 = P \cdot \sin^2(\beta_2) \cos^2(\beta_3) \end{cases} \quad (13)$$

Este sistema, (13), se reduce a resolver la siguiente ecuación:

$$\cos^2(\beta_2) = 2\sin^2(\beta_2)$$

Dando como solución: $\beta_2 = \arctg\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \pm 0.6155 \text{ radianes}$

Puede verse que existe una ambigüedad introducida por las señales cuadradas en las funciones seno y coseno. El canal en la componente en fase está formado por la resta de $s_2(t)$ y $s_3(t)$, por lo tanto, se debe tomar la solución positiva para β_2 y la solución negativa para β_3 :

$$\beta_2 = -\beta_3 = m = 0.6155 \text{ radianes}$$

Como consecuencia, la expresión de las señales en banda base queda definida de la siguiente manera:

$$s_b(t) = \sqrt{2P} \left[[s_2(t)\sin(m)\cos(-m) + s_3(t)\sin(-m)\cos(m)] + j \cdot [s_1(t)\cos(m)\cos(-m) + s_1(t)s_2(t)s_3(t)\sin(m)\sin(-m)] \right] \quad (14)$$

Sabiendo que el seno es una función impar y el coseno una función par, la expresión (14) queda como sigue:

$$s_b(t) = \sqrt{2P} \left[[s_2(t)\sin(m)\cos(m) - s_3(t)\sin(m)\cos(m)] + j \cdot [s_1(t)\cos^2(m) + s_1(t)s_2(t)s_3(t)\sin^2(m)] \right]$$

Volviendo a la cuestión de la amplitud constante, si se analiza la potencia de los diferentes canales añadiendo varias restricciones y definiendo $\sin(m)\cos(m) = A$, $\cos^2(m) = B$ y $\sin^2(m) = C$:

$$s_b(t) = \sqrt{2P} \left[[A \cdot s_2(t) - A \cdot s_3(t)] + j \cdot [B \cdot s_1(t) + C \cdot s_1(t)s_2(t)s_3(t)] \right]$$

- Considerando que el canal 2 y 3 tienen la misma potencia.
- Considerando que el canal 1 supone el 50% de la potencia relativa y los canales 2 y 3, el 25% cada una.

La primera condición expresa que las componentes I y Q de la señal $s_b(t)$ deben estar normalizadas a la unidad:

$$\sqrt{(A^2 - A^2) + (B^2 + C^2)} = 1$$

Con la condición de igualdad de potencia para ambos canales se debe cumplir que:

$$A^2 + A^2 = B^2$$

Por último con la condición de que la suma de potencias es igual a 1:

$$A^2 + A^2 + B^2 + C^2 = 1$$

El sistema es:

$$\begin{cases} B + C = 1 \\ 2A^2 = B^2 \\ 2A^2 + B^2 + C^2 = 1 \end{cases}$$

$$B = 1 - C \rightarrow 2 \cdot (1 - C)^2 + C^2 \rightarrow C = \left\{ \frac{1}{3} \right.$$

Ya que la solución $C=1$ no nos lleva a un resultado razonable, la solución correcta es $C = \frac{1}{3}$.

Entonces:

$$A = \frac{\sqrt{2}}{3} \quad B = \frac{2}{3}$$

De esta forma la señal queda expresada como:

$$s_b(t) = \sqrt{2P} \left[\left[\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot s_2(t) - \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot s_3(t) \right] + j \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot s_1(t) + \frac{1}{3} \cdot s_1(t)s_2(t)s_3(t) \right] \right]$$

Y finalmente, analizando la potencia de cada componente de la ecuación:

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 0.44 \cdot P$$

$$P_2 = P_3 = P \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)^2 = 0.22 \cdot P$$

$$P_{im} = P \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 0.11 \cdot P$$

Nótese que sólo el 88.88% de la potencia total transmitida es útil, pero es el precio a pagar para conseguir que la señal $s(t)$ tenga la característica de amplitud constante.

En la siguiente tabla se muestran las diferentes combinaciones de los tres canales binarios $s_1(t)$, $s_2(t)$ y $s_3(t)$, el módulo de $s(t)$, su parte real e imaginaria y la constelación para este caso de CASM:

$s_1(t)$	$s_2(t)$	$s_3(t)$	$Re \{s(t)\}$	$Im \{s(t)\}$	$ s(t) $
1	1	1	0	1	1
1	1	-1	0.9428	0.3333	1
1	-1	1	-0.9428	0.3333	1
1	-1	-1	0	1	1
-1	1	1	0	-1	1
-1	1	-1	0.9428	-0.3333	1
-1	-1	1	-0.9428	-0.3333	1
-1	-1	-1	0	-1	1

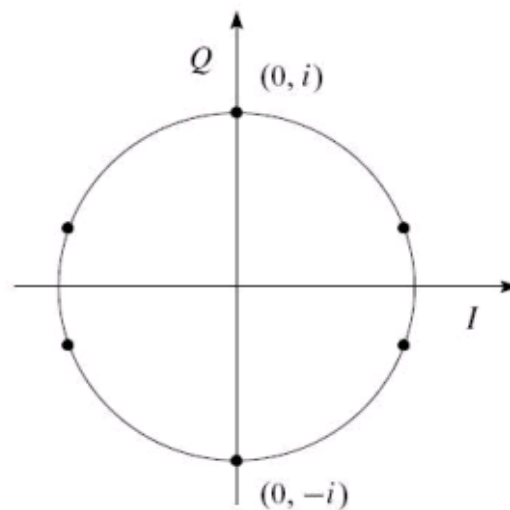


Figura 5. Constelación CASM (*hexaphase*). Obtenida de la referencia [5].

Como se puede ver en la tabla, el módulo de la señal es siempre 1 y por lo tanto queda representada en la constelación de arriba, con todos los puntos incluidos en una circunferencia de radio igual a la unidad. También puede observarse que para los 3 canales binarios hay seis fases diferentes, esto es llamado *tricode hexaphase*. Además también muestra que cada vez que $s_2(t)$ y $s_3(t)$ (suponiendo que son datos y control) sean iguales, toda la potencia quedará concentrada en la componente en cuadratura.

2.5. Códigos de transmisión del sistema Galileo.

Los códigos de transmisión para crear la codificación CDMA (*ranging codes*) usada por todas las señales de galileo. Estos códigos consisten en una modulación de dos tipos de código: un código primario modulado por un código secundario creando la secuencia de *ranging*. A cada componente de la señal se le asigna un código *ranging* con diferentes parámetros los cuales dependen de la longitud (en tiempo, en chips y en el número de registros dentro del registro de desplazamiento con retroalimentación lineal (LFSR en inglés)), ratio de chip y ratio de símbolo.

Se pueden usar “códigos de memoria” o “códigos basados en registro” para implementar ambos códigos. Los códigos de memoria, también llamados “secuencias de pseudo-ruido optimizadas”, son códigos predefinidos diseñados expresamente para que tengan muy buenas características de correlación y necesitan estar almacenados en memoria porque no es posible generarlos de manera sistemática. Los códigos basados en registro se obtienen con un LFSR (el cual está definido completamente con un polinomio tap). Hay “r” registros (determinado según el orden del LFSR) y r+1 taps (los cuales generarán la secuencia).

2.6. Códigos primarios.

Un código primario (ver referencia [\[1\]](#)) se genera a partir de la XOR de dos LFSR que han sido truncados con la longitud deseada (dependiendo de la señal) y que tienen el mismo número de registros. Si tenemos 14 registros el periodo del LFSR será un $2^{14}-1$ (16383) la secuencia de chip si el polinomio tap es un polinomio primitivo. Por ejemplo, si la secuencia más larga que pueda obtenerse es de 10230 chips, significa que el truncamiento realizado es de 10230.

Cada vez que se completa una secuencia, los registros se recargan con los valores iniciales. Para la primera LFSR los valores iniciales son 1's, para la segunda, los valores iniciales varían. En la referencia [\[1\]](#) se muestra un listado que incluye estos valores iniciales junto con las secuencias iniciales, las cuales también están predefinidas.

Todos los valores iniciales están en base 8 (octal). Si se refiere a un polinomio tap, la conversión a binario es: si se tiene el polinomio 40503, todos los números deben ser convertidos a binario de manera separada, en nuestro caso quedaría 100 000 101 000 011. La indexación de esto viene del tap #0 (primer bit de la izquierda) o LSB (bit menos significativo), al tap #14 (último bit) o MSB (bit más significativo). Al ser una estructura LSFR puede comprobarse que tanto el LSB como el MSB son siempre 1.

Al referirse a un valor inicial, la conversión a binario es la siguiente: si tenemos el valor inicial 14234, todos los números deben ser convertidos a binario de manera separada, de esta forma quedaría 001 100 010 011 100, donde el primer valor binario por la izquierda no se usa en nuestro ejemplo (solo tenemos 14 registros), el siguiente es el MSB, con índice #14 y el último es el LSB con índice #1.

En relación con las secuencias iniciales, están en código hexadecimal y el proceso es casi el mismo: todas las cifras son convertidas a binario por separado. Por ejemplo, si la secuencia es 9D8CF1, la conversión quedaría 1001 1101 1000 1100 1111 0001 y se coloca al principio de cada secuencia del segundo LFSR.

2.7. Códigos secundarios.

Los códigos secundarios (ver referencia [\[1\]](#)) son códigos de memoria. Son asignados para una señal específica. Por ejemplo, si está asignado el código CS20₁, CS indica que es un código binario, el siguiente número (20) es el número de chips que tiene el código y el subíndice (1) es el número de códigos, con longitud 20, asignados a la señal. Es decir, para una señal E5a1, tenemos un código primario con una longitud de chip (N_p) de 10230 y un código secundario con una longitud de chip (N_s) de 20. Además, el código resultante de la combinación de estos tiene una longitud de 20ms y un ratio de chip de 10.230 MChip/s. Por lo tanto, tenemos una secuencia total con una longitud de $10230 \text{ chips} \times 20 \text{ chips} = 204600 \text{ chips}$, lo que coincide con el producto de $20 \text{ ms} \times 10.230 \text{ MChip/s} = 204600 \text{ chips}$. Para obtener la cantidad total de chips, cada chip del código secundario es multiplicado por todos los chips del código primario, teniendo al final una longitud de $N_p \times N_s \text{ chips}$.

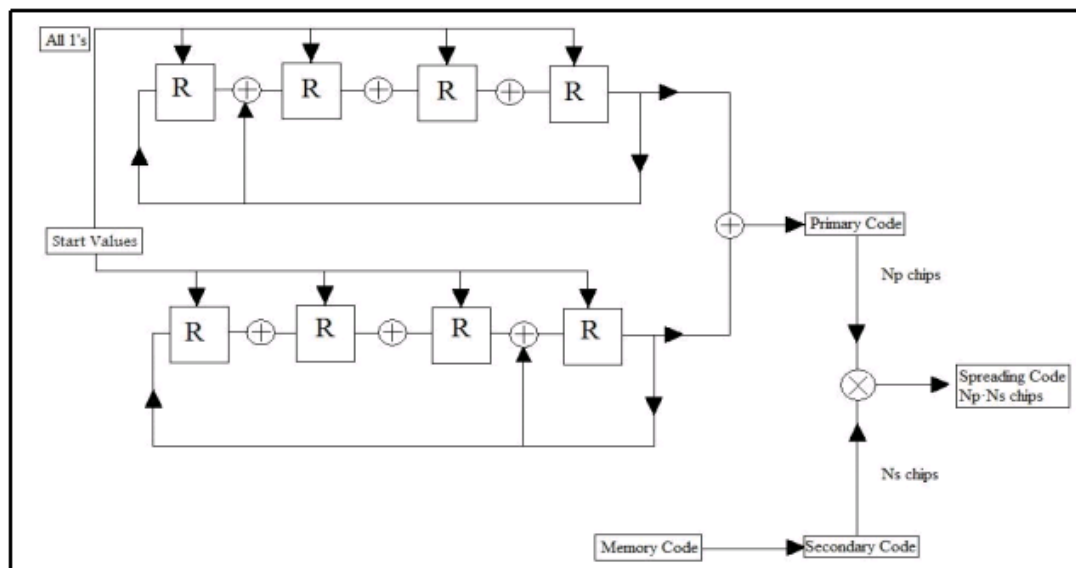


Figura 6. Esquema de codificación CDMA (simplificada). Obtenida de la referencia [1].

En esta figura se muestra el esquema usado para obtener la codificación CDMA. Representa una versión simplificada de un polinomio de 14° grado.

También puede apreciarse los dos LFSRs que conforman el código primario. El primer grupo de registros tiene sus valores iniciales siempre igual a 1 mientras que en el segundo grupo de registros, los valores iniciales se toman de una lista. Como se comentó anteriormente, los códigos secundarios son códigos de memoria y modulan el código primario como se muestra en la figura: un chip del secundario multiplica a todos los chips del primario formando una secuencia de $N_p \times N_s$ chips.

2.8. Asignación de códigos.

Los códigos se implementan con la mayor fiabilidad posible dado que algunos datos a transmitir son ambiguos. Por lo tanto, se asume la implementación de *ranging* codes para E6 (canal A) y L1 (canal A) dado que la información es restringida para las componentes de ambas señales.

La importancia de todos estos códigos reside en la decodificación de los mismos (adquirir y seguir un satélite específico). La variación de los *ranging*

codes se refleja en su ratio de chip, cuanto mayor sea este, más ancho será el lóbulo principal.

2.8.1. *Ranging codes* para E5.

Los *ranging codes* para esta señal se muestran en la referencia [1]. Pueden ser implementados a partir de códigos de memoria o a partir de códigos basados en registro. Para ello se usan dos LFSRs de 14° grado que generan el llamado “código de oro” (la XOR de dos secuencias con la misma longitud $2^m - 1$, siendo m el orden usado, la cual proporciona sólo 3 valores en su función de correlación cruzada).

Solo se ha usado un código secundario para cada canal de control E5aQ y E5bQ, a pesar de contar hasta con 50 códigos secundarios diferentes para cada componente de la señal. Sin embargo, la cantidad de códigos secundarios es el necesario para los canales E5aI y E5bI. Además, la generación de estos códigos para estos canales implica que ambos LFSR reseteen su código primario unas 100 veces, porque hay un código secundario de 100 chips. Por lo tanto, como sólo se proporcionan 50 valores iniciales diferentes (para el segundo registro), para realizar la simulación se tomará los 50 valores restantes como los mismos, pero dando la vuelta al orden en que entraron en los LFSRs.

2.8.2. *Ranging codes* para E6.

La información sobre los *ranging codes* de esta señal se proporciona en [1]. Cada *ranging code* es implementado por dos LFSRs de 13° grado (canal B) y por otros dos LFSRs de 14° grado (canal C), siendo también “códigos de oro”. Además, el canal C tiene un código secundario de 50 bits los cuales modulan el código primario. Se proporciona la información de ambos canales B y C, listada en la referencia [1]. Sin embargo, como la información del canal A esta restringida, se supondrá igual que la información de B multiplicada por -1.

2.8.3. *Ranging codes* para L1-E1.

Los *ranging codes* de E1 son códigos en memoria y están suministrados en la referencia [1]. Hay 50 códigos para cada componente E1b y E1c. Solo se usa uno de estos códigos para la generación del canal B mientras que para el canal C, consiste en una modulación de un código primario y un código secundario (ambos códigos de memoria). Una vez más, la información del canal A esta restringida en esta banda, por lo tanto, se asumirá igual que uno de los códigos de la lista para el canal B (ver referencia [1]).

2.9. Generación de la señal.

Las bandas de frecuencias usadas por las señales Galileo han sido seleccionadas dentro del espectro asignado por los servicios de radionavegación por satélite (RNSS en inglés). Además, las bandas E5a, E5b y E1 han sido incluidas en el espectro asignado por los servicios de radionavegación aeronáutica (ARNS en inglés).

La siguiente tabla muestra los parámetros usados para generar las diferentes señales del sistema Galileo:

- “X” para referirnos a la portadora (E5, E5a, E5b, E6 o E1).
- “Y” para referirnos a la componente (A, B, C, I o Q) dentro de la señal “X”.

Parámetro	Descripción	Unidades
f_x	Frecuencia portadora	Hz
P_x	Potencia de la señal RF	W
$L_{x,y}$	Periodo de repetición del <i>ranging code</i>	chips
$T_{C,x,y}$	Longitud de chip del <i>ranging code</i>	s
$T_{S,x,y}$	Periodo de la subportadora	s

$T_{D,x,y}$	Duración de símbolo del mensaje de navegación	s
$R_{C,x,y}$	$= \frac{1}{T_{C,x,y}}$ ratio de chip del <i>ranging code</i>	Hz
$R_{S,x,y}$	$= \frac{1}{T_{S,x,y}}$ frecuencia de la subportadora	Hz
$R_{D,x,y}$	$= \frac{1}{T_{D,x,y}}$ ratio de símbolo del mensaje de navegación	Hz
$S_{x(t)}$	Representación de la señal en paso banda	N/A
$C_{X,Y(t)}$	<i>Ranging code</i> binario (modulado NRZ)	N/A
$D_{X,Y(t)}$	Mensaje de la señal de navegación en binario (modulado NRZ)	N/A
$s_{CX,Y(t)}$	Subportadora en binario (modulado NRZ)	N/A
$e_{X,Y(t)}$	Componente de la señal de navegación en binario (modulado NRZ). Incluye el <i>ranging code</i> , la subportadora y los datos del mensaje de navegación (cuando estos dos últimos están disponibles); $(= C_{X,Y(t)} s_{CX,Y(t)} D_{X,Y(t)})$	N/A
$s_{X(t)}$	Señal normalizada en banda base (Potencia media igual a la unidad) $= s_{X,I(t)} + j s_{X,Q(t)}$	N/A
$c_{X,Y,k}$	k_{th} Chip del <i>ranging code</i>	N/A
$d_{X,Y,k}$	k_{th} símbolo del mensaje de navegación	N/A
$DC_{X,Y}$	$= \frac{T_{D,x,y}}{T_{C,x,y}}$ número de chips del <i>ranging code</i> por símbolo	N/A
$ i _L$	i módulo L	N/A
$ i _{DC}$	Parte entera de i/DC	N/A
$rect_T(t)$	Función “rectángulo” que es igual a 1 para $0 < t < T$ e igual a 0 en el resto	N/A

Tabla 2. Parámetros usados para la generación de las señales. Obtenida de la referencia [1].

2.9.1. Señal E5.

La señal E5 de galileo está formada por las componentes E5a y E5b y es transmitida en la banda de frecuencias 1164-1215 MHz (adjudicada por la RNSS). Comparte esta banda junto con otras señales pertenecientes a EGNOS, GPS, GLONASS, etc.

Esta señal es modulada y multiplexada con AltBOC(15,10), siendo esta técnica una de las promesas más innovadoras que trae el sistema Galileo. Este esquema de modulación da lugar a una señal modulada con una amplitud constante que, como mencionamos anteriormente también puede ser considerada como una técnica de multiplexación. Dado que la modulación AltBOC separa el espectro en dos lóbulos principales, la banda E5 puede ser usada como dos bandas laterales separadas, definidas convencionalmente como E5A y E5B en las que se transmiten 4 canales diferentes (E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q). Cada canal de información y de control son las componentes en fase y en cuadratura, respectivamente, ya que todas las señales son proporcionadas en banda base.

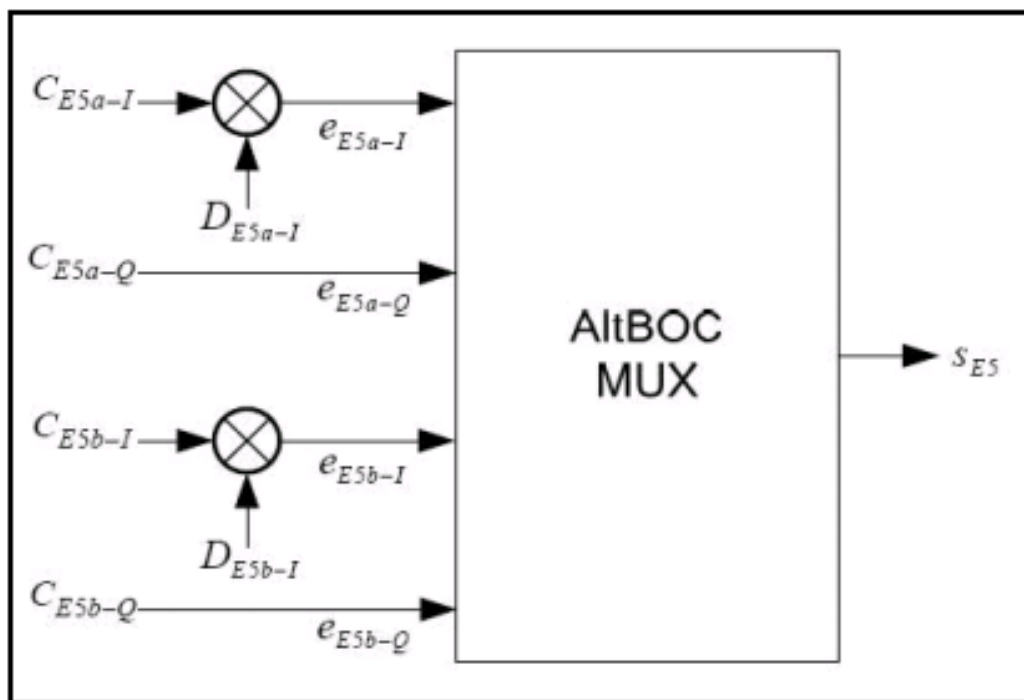


Figura 7. Esquema de multiplexación de la señal E5. Obtenida de la referencia [1].

Esta figura muestra el esquema usado para la generación de la señal E5.

Los canales de información D_{E5a-I} y D_{E5b-I} se transmiten con un ratio de 50 y 250 símbolos por segundo, respectivamente y el ratio de chip de los *ranging codes* es $10 \cdot f_o$ (10.230 MChip/s). Las componentes C_{E5a-I} , C_{E5a-Q} , C_{E5b-I} , C_{E5b-Q} son *ranging codes* des-encryptados y C_{E5a-I} y C_{E5b-I} modulan las componentes D_{E5a-I} y D_{E5b-I} , respectivamente.

$$e_{E5a-I}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \left[c_{E5a-I, [i]_{LE5a-I}} d_{E5a-I, [i]_{DCE5a-I}} \text{rect}_{T_{C, E5a-I}}(t - iT_{C, E5a-I}) \right]$$

$$e_{E5a-Q}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \left[c_{E5a-Q, [i]_{LE5a-Q}} \text{rect}_{T_{C, E5a-Q}}(t - iT_{C, E5a-Q}) \right]$$

$$e_{E5b-I}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \left[c_{E5b-I, [i]_{LE5b-I}} d_{E5b-I, [i]_{DCE5b-I}} \text{rect}_{T_{C, E5b-I}}(t - iT_{C, E5b-I}) \right]$$

$$e_{E5b-Q}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \left[c_{E5b-Q, [i]_{LE5b-Q}} \text{rect}_{T_{C, E5b-Q}}(t - iT_{C, E5b-Q}) \right]$$

Figura 8. Componentes de la señal E5. Obtenida de la referencia [1].

Por lo tanto, un único canal de información (equivalente a una señal BPSK) y un canal de control (otra señal BPSK) se transmitirán en cada banda lateral. La señal, modulada con AltBOC, es equivalente a dos QPSKs separadas (formando una constelación 8-PSK) colocadas, respectivamente, a lo largo de la frecuencia central de E5a y E5b.

La señal E5a de Galileo es un elemento intrínseco de la señal E5 y está formada por una componente de información transmitida en la componente en fase y una componente de control transmitida en la componente en cuadratura. Esta información es un mensaje de navegación gratuitamente accesible (F/NAV en inglés) que se utiliza para el servicio abierto de galileo y se solapa (en el espectro) con la señal GPS-L5.

La señal E5b de Galileo es un elemento intrínseco de la señal E5 y consiste en una componente de información transmitida en la componente en fase y una componente de control transmitida en la componente en cuadratura. La información proporcionada en este caso se trata de un mensaje de navegación de integridad (I/NAV) y es usada para el servicio para aplicaciones críticas, para el servicio abierto y para la integridad del servicio de Galileo.

$$s_{E5}(t) = \exp\left(j \frac{\pi}{4} k(t)\right) \quad \text{with} \quad k(t) \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$$

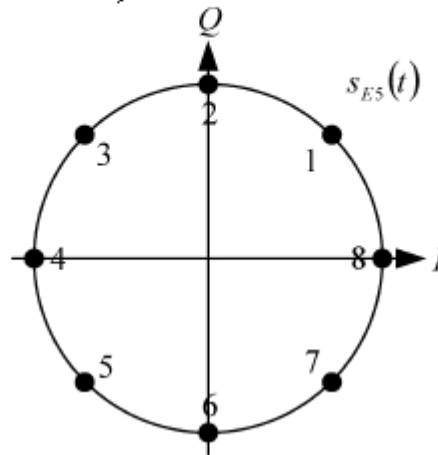


Figura 9. Constelación 8-PSK (señal E5). Obtenida de la referencia [\[1\]](#).

En esta figura se muestran las diferentes fases que puede tomar la señal E5. Así como la constelación 8-PSK generada.

La salida del multiplexor proporciona la señal E5 en el formato siguiente:

$$\begin{aligned}
 s_{E5}(t) = & \frac{1}{2\sqrt{(2)}} \left(e_{E5a-I}(t) + j e_{E5a-Q}(t) \right) \left[sc_{E5-S}(t) - j sc_{E5-S}\left(t - \frac{T_{s,E5}}{4}\right) \right] + \\
 & \frac{1}{2\sqrt{(2)}} \left(e_{E5b-I}(t) + j e_{E5b-Q}(t) \right) \left[sc_{E5-S}(t) + j sc_{E5-S}\left(t - \frac{T_{s,E5}}{4}\right) \right] + \\
 & \frac{1}{2\sqrt{(2)}} \left(\bar{e}_{E5a-I}(t) + j \bar{e}_{E5a-Q}(t) \right) \left[sc_{E5-P}(t) - j sc_{E5-P}\left(t - \frac{T_{s,E5}}{4}\right) \right] + \\
 & \frac{1}{2\sqrt{(2)}} \left(\bar{e}_{E5b-I}(t) + j \bar{e}_{E5b-Q}(t) \right) \left[sc_{E5-P}(t) + j sc_{E5-P}\left(t - \frac{T_{s,E5}}{4}\right) \right]
 \end{aligned}$$

Figura 10. Expresión de la señal E5. Obtenida de la referencia [1].

Las componentes de señal \bar{e}_{E5a-I} , \bar{e}_{E5a-Q} , \bar{e}_{E5b-I} y \bar{e}_{E5b-Q} representan el producto del resto de los canales excepto el mismo, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \bar{e}_{E5a-I} &= e_{E5a-Q} e_{E5b-I} e_{E5b-Q} & \bar{e}_{E5a-Q} &= e_{E5a-I} e_{E5b-I} e_{E5b-Q} \\
 \bar{e}_{E5b-I} &= e_{E5a-I} e_{E5a-Q} e_{E5b-Q} & \bar{e}_{E5b-Q} &= e_{E5a-I} e_{E5a-Q} e_{E5b-I}
 \end{aligned}$$

Y los parámetros sc_{E5-P} y sc_{E5-S} representan los cuatro posibles valores que se obtienen de las funciones que definen las subportadoras:

$$\begin{aligned}
 sc_{E5-S}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} AS_{|i|_8} rect_{\frac{T_{s,E5}}{8}} \left(t - \frac{iT_{s,E5}}{8} \right) \\
 sc_{E5-P}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} AP_{|i|_8} rect_{\frac{T_{s,E5}}{8}} \left(t - \frac{iT_{s,E5}}{8} \right)
 \end{aligned}$$

i	0	1	2	3	4	5	6	7
ASi	$\frac{\sqrt{(2)}+1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{(2)}+1}{2}$	$-\frac{\sqrt{(2)}+1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{(2)}+1}{2}$
APi	$-\frac{\sqrt{(2)}+1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{(2)}-1}{2}$	$\frac{\sqrt{(2)}-1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{(2)}+1}{2}$

Tabla 3. Coeficientes de la subportadora AltBOC. Obtenida de la referencia [1].

Como el ancho de banda de E5 es muy amplio es interesante tomar ventaja de ello usando señales de banda amplia. Además, con el uso de la modulación AltBOC se obtienen muchísimas ventajas como que solo se necesita una única cadena para transmitir las cuatro componentes, que proporciona una señal con amplitud constante y que se puede procesar una señal amplia en recepción y dos bandas laterales de manera independiente. Sin embargo, existen ciertas desventajas como la dificultad de implementarlo y los productos de intermodulación (interferencias) que aparecen a causa de las componentes \bar{e}_x anteriormente mencionadas.

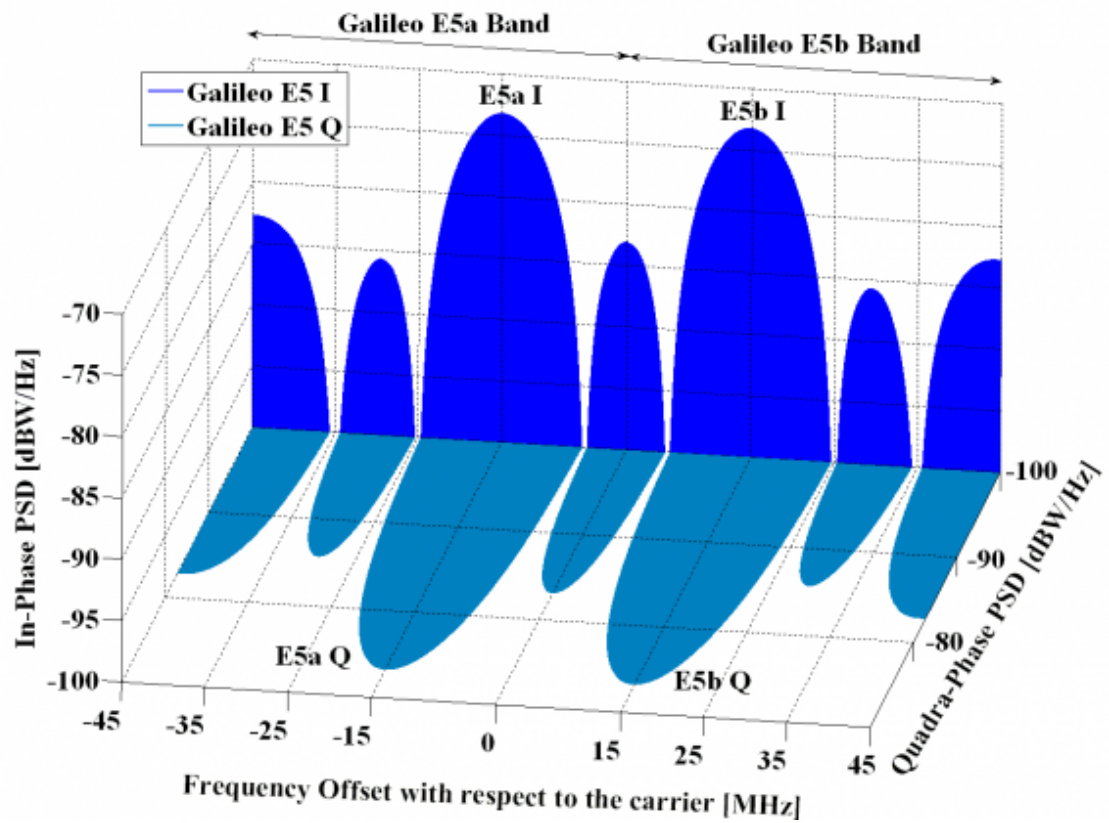


Figura 11. Espectro de las señales de Galileo (banda E5). Obtenida de la referencia [\[3\]](#).

GNSS System	Galileo	Galileo	Galileo	Galileo
Service Name	E5a data	E5a pilot	E5b data	E5b pilot
Centre Frequency	1191.795 MHz			
Frequency Band	E5			
Access Technique	CDMA			
Spreading modulation	AltBOC(15,10)			
Sub-carrier frequency	15.345 MHz			
Code frequency	10.23 MHz			
Signal Component	Data	Pilot	Data	Pilot
Primary PRN Code length	10230			
Code Family	Combination and short-cycling of M-sequences			
Secondary PRN Code length	20	100	4	100
Data rate	50 sps	-	250 sps	-
Minimum Received Power [dBW]	-155 dBW		-155 dBW	
Elevation	10°		10°	

Tabla 4. Características técnicas de la señal E5. Obtenida de la referencia [3].

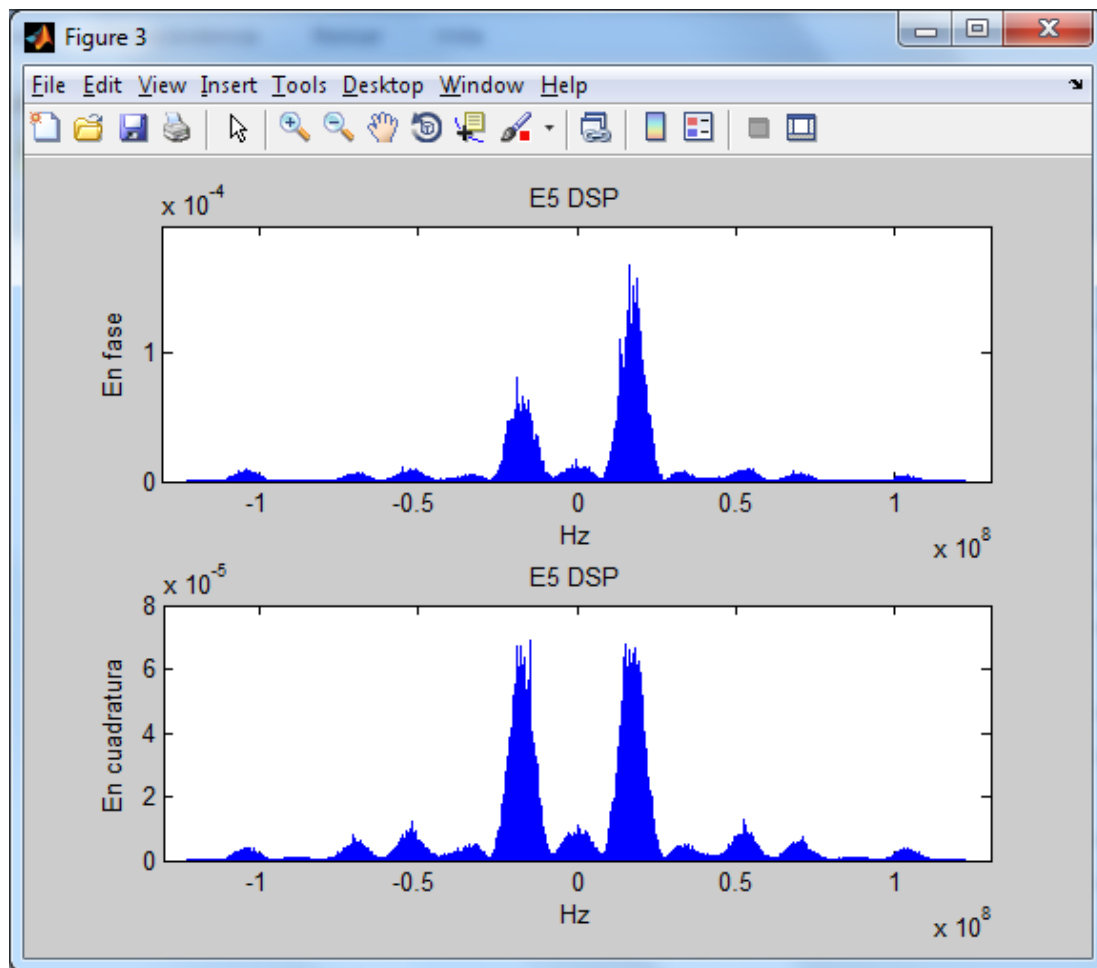


Figura 12. DSP de la señal E5.

2.9.2. Señal E6.

La señal E6 de Galileo está formada por las componentes E6b y E6c y es transmitida en la banda de frecuencias 1215-1300 MHz (adjudicada por la RNSS), compartida con los sistemas de radar de radionavegación y el servicio de radiolocalización. Las componentes de señal E6b y E6c son las componentes de información y de control, respectivamente. La señal E6 se utiliza para el servicio comercial generando un mensaje de navegación comercial (C-NAV en inglés).

Esta señal es modulada con una BPSK con frecuencia igual a $5 \cdot f_o$ (5.115 MChip/s) y un ratio de símbolo de 1000 Símbolos por segundo. Ya que esta

banda no se utiliza en GPS o en GLONASS, no hay muchas limitaciones para elegir el tipo de modulación.

A continuación se muestra el formato de la señal E6, el esquema para multiplexar la señal, así como la definición de sus componentes:

$$s_{E6}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E6-B}(t) - e_{E6-C}(t)]$$

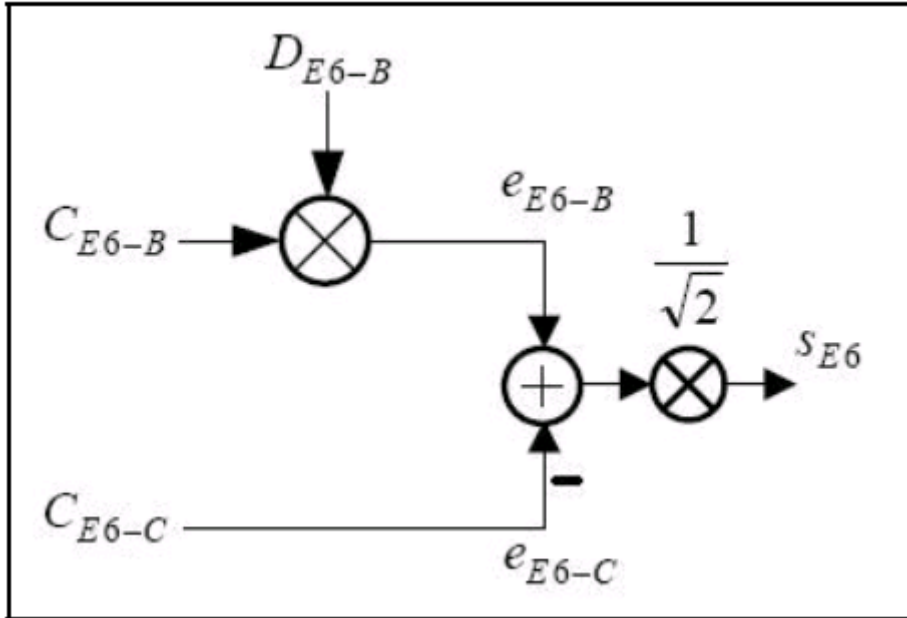


Figura 13. Esquema de multiplexación de la señal E6. Obtenida de la referencia [1].

En esta figura podemos observar que la componente de información de la señal E6, e_{E6-B} , se genera a partir de D_{E6-B} modulada por el *ranging code* C_{E6-B} . Mientras que la componente de control de la señal E6, e_{E6-C} , se construye a partir del *ranging code* C_{E6-C} .

$$e_{E6-B}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [c_{E6-B,|i|_{LE6-B}} d_{E6-B,|i|_{DCE6-B}} \text{rect}_{T_{C,E6-B}}(t - iT_{C,E6-B})]$$

$$e_{E6-C}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [c_{E6-C,i} |_{LE6-C} \text{rect}_{T_{C,E6-C}}(t - iT_{C,E6-C})]$$

La banda E6P (canal A) está restringida y no se proporciona información para esta señal, únicamente que la modulación usada es una BOCcos(10,5).

Finalmente, se puede expresar la señal E6 en banda base como:

$$S_{E6}(t) = \{e_{E6-A}(t) \cdot \cos(m) - e_{E6-C}(t) \cdot \sin(m)\} + j \cdot \{e_{E6-B}(t) \cdot \cos(m) + e_{E6-A}(t) \cdot \sin(m)\}$$

Donde $m=0.6155$ radianes. Este parámetro es conocido como índice de modulación.

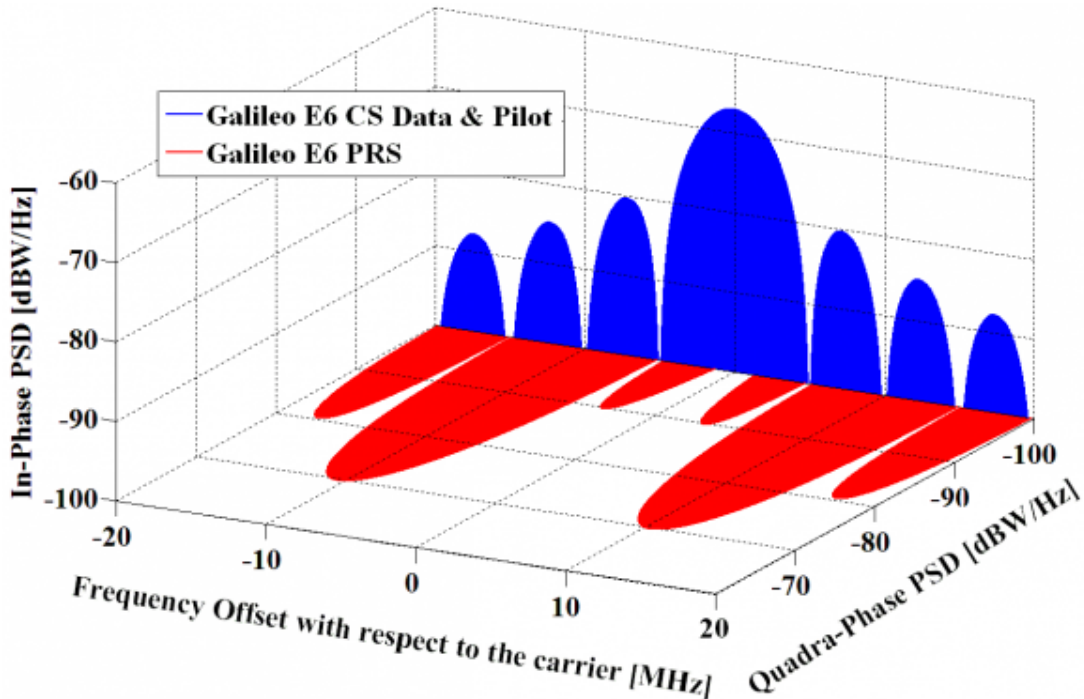


Figura 14. Espectro de las señales de Galileo (banda E6). Obtenida de la referencia [3].

GNSS System	Galileo	Galileo	Galileo
Service Name	E6 CS data	E6 CS pilot	E6 PRS
Centre Frequency	1278.75 MHz		
Frequency Band	E6		
Access Technique	CDMA		
Spreading modulation	BPSK(5)	BPSK(5)	BOC _{cos} (10,5)
Sub-carrier frequency	-	-	10.23 MHz
Code frequency	5.115 MHz		
Signal Component	Data	Pilot	Data
Primary PRN Code length	5115	5115	N/A
Code Family	Memory codes		N/A
Secondary PRN Code length	-	100	N/A
Data rate	1000 sps	-	N/A
Minimum Received Power [dBW]	-155		N/A
Elevation	10°		N/A

Tabla 5. Características técnicas de la señal E6. Obtenida de la referencia [\[3\]](#).

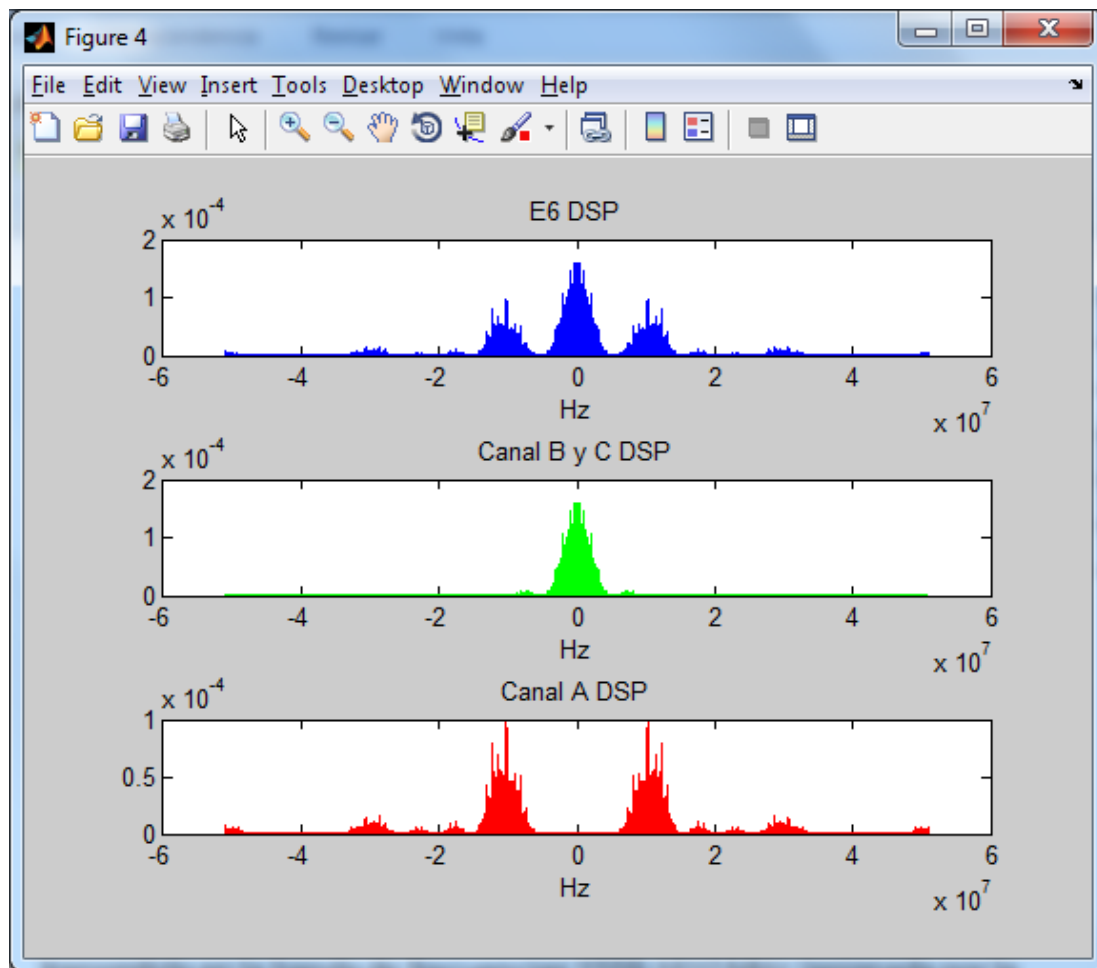


Figura 15. DSP de la señal E6.

2.9.3. Señal E1.

La señal E1 de Galileo está formada por las componentes E1b y E1c y es transmitida en la banda de frecuencias 1559-1610 MHz (asignada por la RNSS). Las componentes de las señales E1b y E1c son la componente de información y la componente de control respectivamente. La señal E1 proporciona el mensaje I/NAV usado en el servicio para aplicaciones críticas, en el servicio abierto y en el sistema de integridad de Galileo.

Esta señal está modulada con CBOC(6,1,1/11) o BOC compuesta con $f_o = 1.023$ MHz y ratio de chip igual a 1.023 MChip/s. La información en la componente E1b se transmite a un ratio igual a 250 símbolos/s. La señal se modula con dos subportadoras diferentes: $sc_a = f_o$ y $sc_b = 6 \cdot f_o$. Ambas

componentes E1b (información) y E1c (control) son moduladas en la misma componente de la subportadora, por lo tanto la potencia usada para su transmisión se divide al 50%.

CBOC es una combinación lineal entre las subportadoras moduladas con BOC(1,1) y BOC (6,1). Estas subportadoras, siendo la suma de dos subportadoras cuadradas, tendrán 4 niveles diferentes.

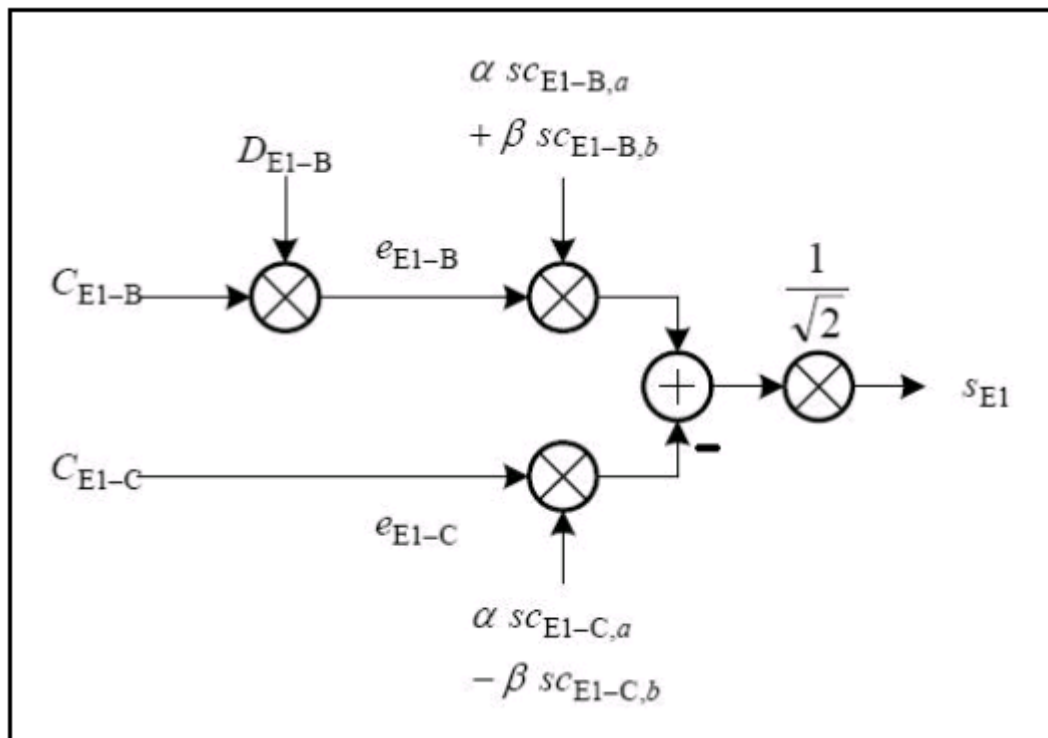


Figura 16. Esquema de multiplexación de la señal E1. Obtenida de la referencia [\[1\]](#).

En esta figura se muestra el esquema de la multiplexación de la señal E1.

La potencia de BOC(6,1) supone la onceava parte de la potencia total de la señal para el servicio abierto. Además de por otros parámetros, la implementación actual de la BOC multiplexada (MBOC) depende tanto de la potencia compartida entre los canales de control y de información, como del porcentaje usado en la subportadora BOC(6,1) en cada uno de estos canales.

$$S_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) \left(\alpha sc_{E1-B,a}(t) + \beta sc_{E1-B,b}(t) \right) - e_{E1-C}(t) \left(\alpha sc_{E1-C,a}(t) + \beta sc_{E1-C,b}(t) \right) \right)$$

Donde $sc_x(t) = \text{sign}(\text{sen}(2\pi R_{s,x}t))$

$$\alpha = \sqrt{\frac{10}{11}} \quad \beta = \sqrt{\frac{1}{11}}$$

Los parámetros α y β son elegidos para que la potencia de la combinación de las componentes de la subportadora, $sc_{E1-B,b}$ y $sc_{E1-C,b}$ se corresponda con la onceava parte de la potencia total de e_{E1-B} más e_{E1-C} . Nótese que el signo de la subportadora BOC(6,1) es diferente para el canal de información que para el canal de control. Esto es necesario para evitar los términos cruzados que aparecen de la correlación cruzada entre las subportadoras BOC(1,1) y BOC(6,1).

Así las components de la señal E1 quedan:

$$e_{E1-B}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [c_{E1-B,i|_{LL1-B}} d_{E1-B,i|_{DC E1-B}} \text{rect}_{T_{C,E1-B}}(t - iT_{C,E1-B})]$$

$$e_{E1-C}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [c_{E1-C,i|_{LL1-C}} \text{rect}_{T_{C,E1-C}}(t - iT_{C,E1-C})]$$

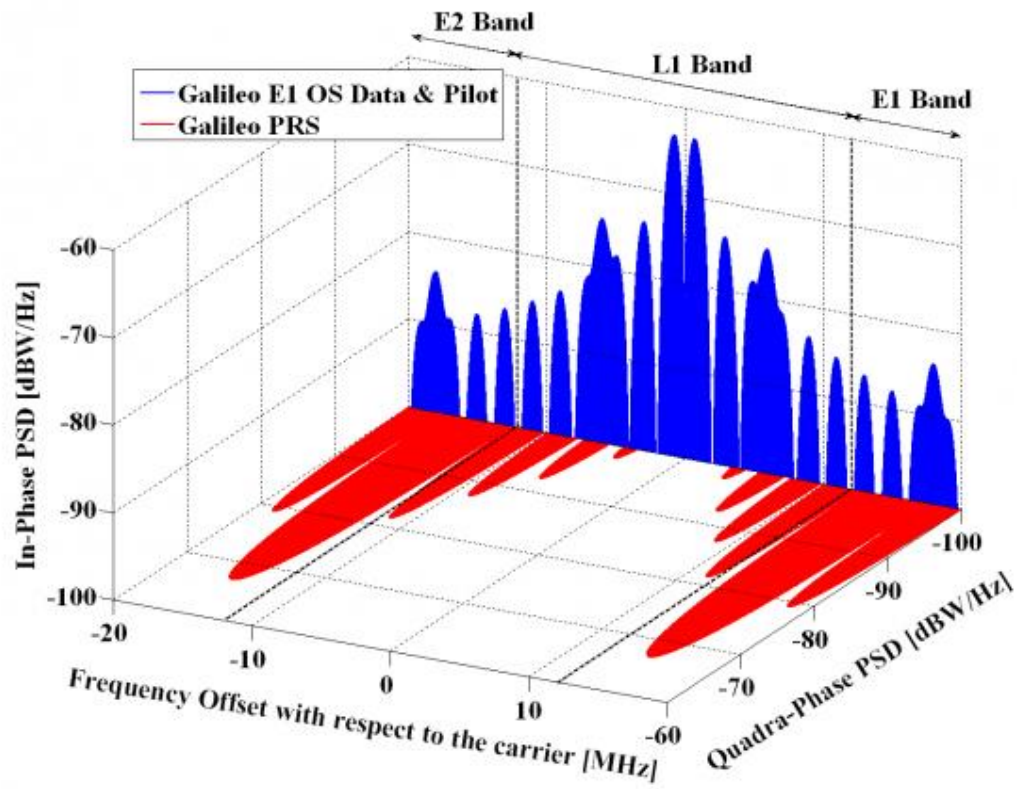


Figura 17. Espectro de las señales de Galileo (banda E1/L1). Obtenida de la referencia [3].

GNSS System	Galileo	Galileo	Galileo
Service Name	E1 OS		PRS
Centre Frequency	1575.42 MHz		
Frequency Band	E1		
Access Technique	CDMA		
Spreading modulation	CBOC(6,1,1/11)		$\text{BOC}_{\cos}(15,2.5)$
Sub-carrier frequency	1.023 MHz and 6.138 (Two sub-carriers)		15.345 MHz
Code frequency	1.023 MHz		2.5575 MHz
Signal Component	Data	Pilot	Data
Primary PRN Code length	4092		N/A
Code Family	Random Codes		N/A
Secondary PRN Code length	-	25	N/A
Data rate	250 sps	-	N/A
Minimum Received Power [dBW]	-157		N/A
Elevation	10°		N/A

Tabla 6. Características técnicas de la señal E1. Obtenida de la referencia [\[3\]](#).

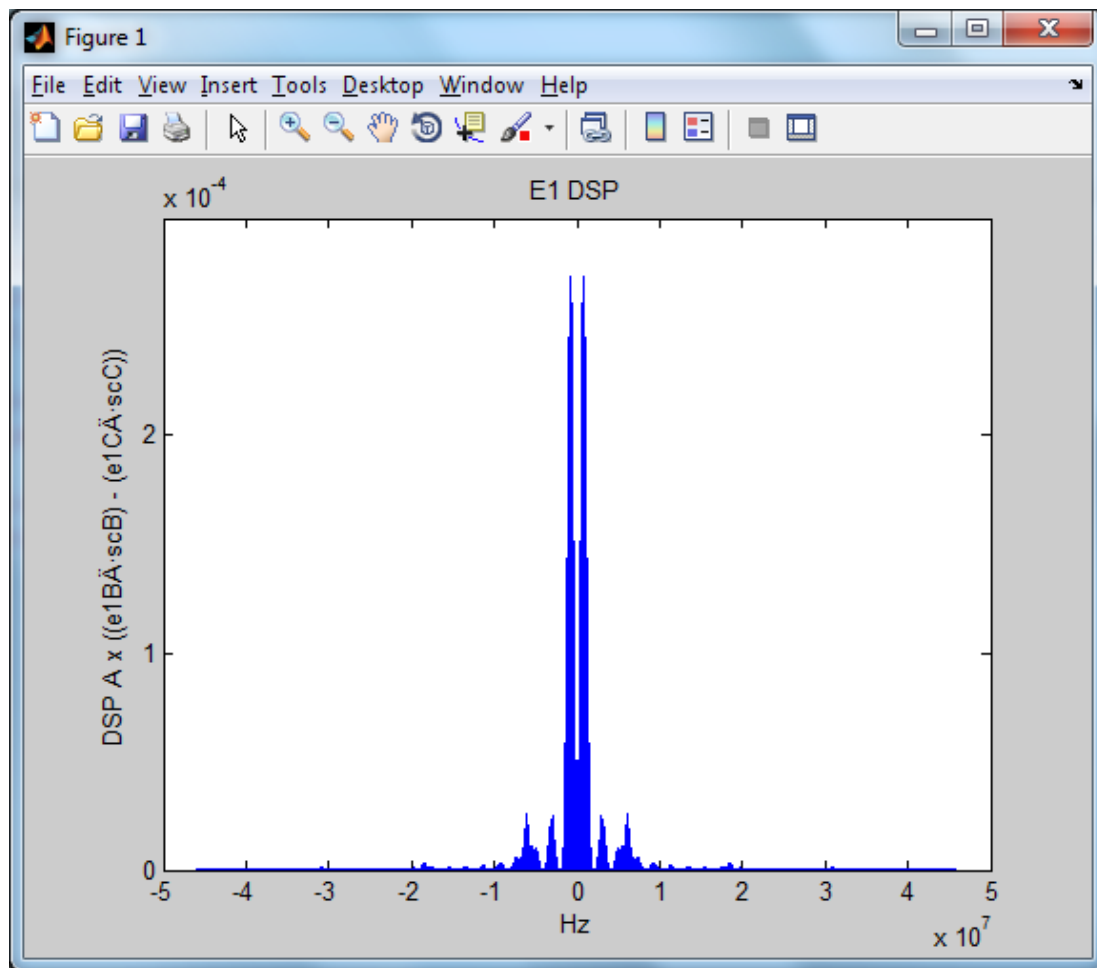


Figura 18. DSP de la señal E1.

2.9.4. Señal L1.

La señal L1 está compuesta por los canales (o componentes) L1a, L1b y L1c y son transmitidas en la banda de frecuencias 1559-1610 MHz asignadas por la RNSS.

L1F es una señal de acceso abierto transmitida en la banda L1 compuesta por un canal de información y un canal de control (las componentes L1b y L1c respectivamente). Contiene *ranging codes* des-encryptados y datos de navegación (información), la cual es accesible para todos los usuarios. El flujo de datos de navegación de L1F se corresponde con un tipo de mensaje I/NAV y contiene tanto mensajes de integridad como datos encryptados para el servicio comercial de Galileo.

L1P es una señal de acceso restringido transmitida en el canal L1a. Sus *ranging codes* y sus datos de navegación están encriptados a partir de un algoritmo de encriptación gubernamental. El flujo de datos de navegación de la señal L1P se corresponde con un tipo de mensaje G/NAV (señal mapeada por el servicio público regulado).

EL canal L1a está modulado con una BOCcos(15,2.5) y multiplexada junto con la señal E1, mencionada en el apartado anterior, con un multiplexor CASM. A continuación se muestra el esquema de modulación de la señal L1.

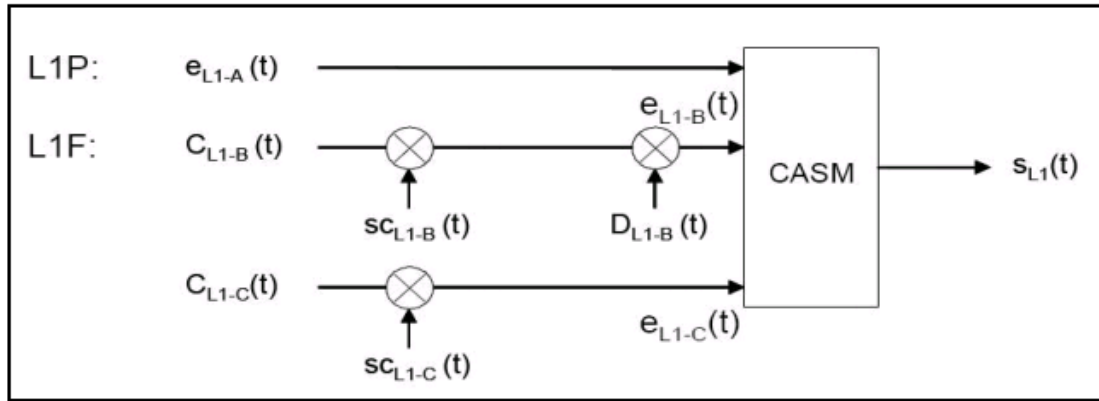


Figura 19. Esquema de multiplexación de la señal L1. Obtenida de la referencia [1].

Así, la expresión resultante tras la multiplexación de todas las componentes de L1 sería:

$$s_{L1}(t) = \frac{1}{3} \{ [\sqrt{2} \cdot e_{L1-B}(t) - \sqrt{2} \cdot e_{L1-C}(t)] + j \cdot [2 \cdot \sqrt{2} \cdot e_{L1-A}(t) + \sqrt{2} \cdot e_{L1-A}(t) \cdot 2 \cdot e_{L1-B}(t) \cdot e_{L1-C}(t)] \}$$

La amplitud constante se mantiene añadiendo a los canales deseados a, b y c una señal adicional que consiste en el producto de todas las señales deseadas en binario (el segundo termino de la parte imaginaria de la expresión de arriba).

Para evitar posibles confusiones, E1 y L1a son tratadas de manera independiente porque existe diferente información en ellas que resulta útil. E1 está incluida en la banda L1 y podría corresponderse con la banda L1F (canales b y c).

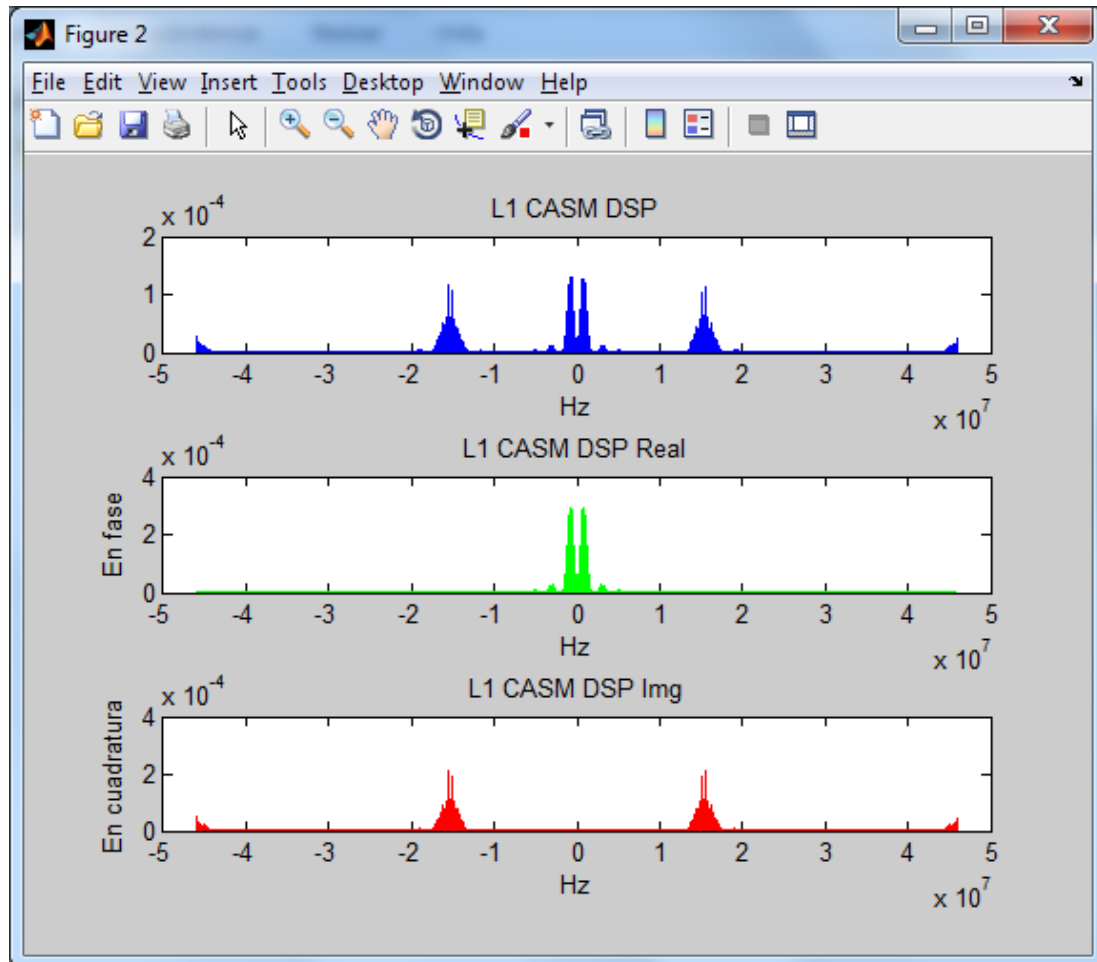


Figura 20. DSP señal L1.

La importancia de que sea una señal de amplitud constante se debe principalmente al uso de amplificadores en el receptor. Por ejemplo, si la potencia de entrada es constante entonces el consumo es constante, pudiendo hacer una predicción del mismo. Además los conversores Digital-analógicos funcionan mejor si la señal de entrada se aproxima al rango dinámico y es más fácil de diseñar un control de la ganancia automático. Como los amplificadores tienen una zona de funcionamiento lineal, las señales cuya potencia no fuese constante, podrían presentar picos no deseados que provoquen entrar en la zona no lineal del amplificador y se genere distorsiones, además de que podrían saturar el amplificador. Los

amplificadores reales pueden presentar un efecto memoria y que su funcionamiento dependa de la potencia de entrada, por lo tanto, variaciones abruptas en la amplitud podrían cambiar la constante de amplificación. Éstas son solo algunas de las razones por las que es importante que una señal tenga amplitud constante.

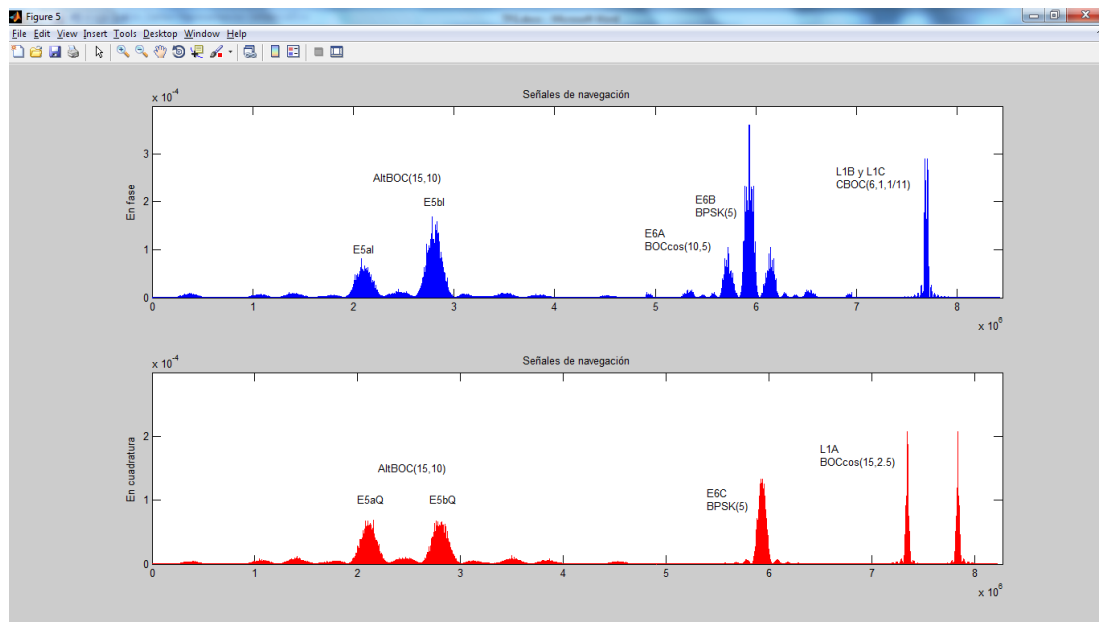


Figura 21. Señales de navegación.

3. Estado del arte.

Actualmente existen varios programas o conjunto de ficheros de código que realizan una simulación de las señales de navegación del sistema Galileo con el uso de Matlab.

Un ejemplo de este tipo de programas es *Satellite Navigation* (SatNav) *Toolbox* (ver referencia [\[9\]](#)) desarrollado por la empresa GPSoft. Este programa está compuesto por una serie de ficheros de Matlab que permiten simular y analizar tanto el sistema Galileo como el sistema GPS, lo cual es muy útil para realizar una comparación entre ambos sistemas. Además, es posible emular varios problemas comunes al propagar las señales transmitidas por estos sistemas (multicamino, ruido, interferencia ionosférica, etc.). Procesa información real con soporte de RINEX (*Receiver INdependent EXchange*), un formato de ficheros de texto orientado a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite.

Otro programa similar al tema tratado es N-FUELS (*FULL Educational Library of Signals for Navigation*, ver referencia [\[10\]](#)) desarrollado por el grupo NavSAS (*Navigation Signal Analysis and Simulation*) formado por investigadores y profesores del área de tecnologías de navegación del instituto superior Mario Boella y el instituto politécnico de Turín. El programa incluye una GUI (Graphical User Interface) bastante explicativa que facilita su comprensión. Permite generar señales de los sistemas GPS, Galileo y EGNOS en todas las bandas actuales y futuras. Además, es posible configurar sus parámetros, incluir un mensaje de navegación, emular el ruido y la interferencia ionosférica y multicamino, analizar la señal resultante e incluso filtrar la señal con un filtro personalizado o algunos de los incluidos en el programa (filtros *Butterworth* y *Chebyshev*).

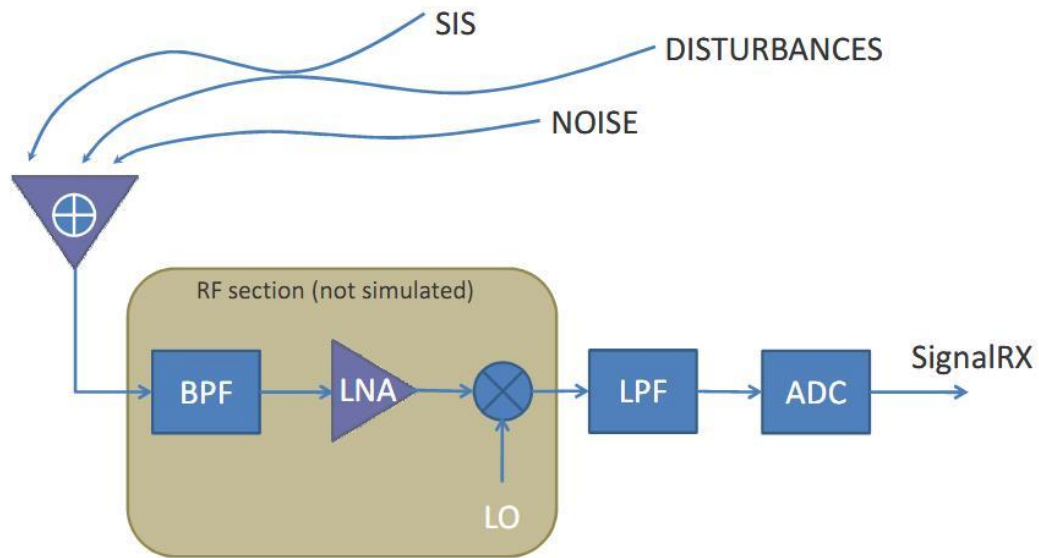


Figura 22. Elementos del sistema simulados por N-FUELS. Obtenida de la referencia [10].

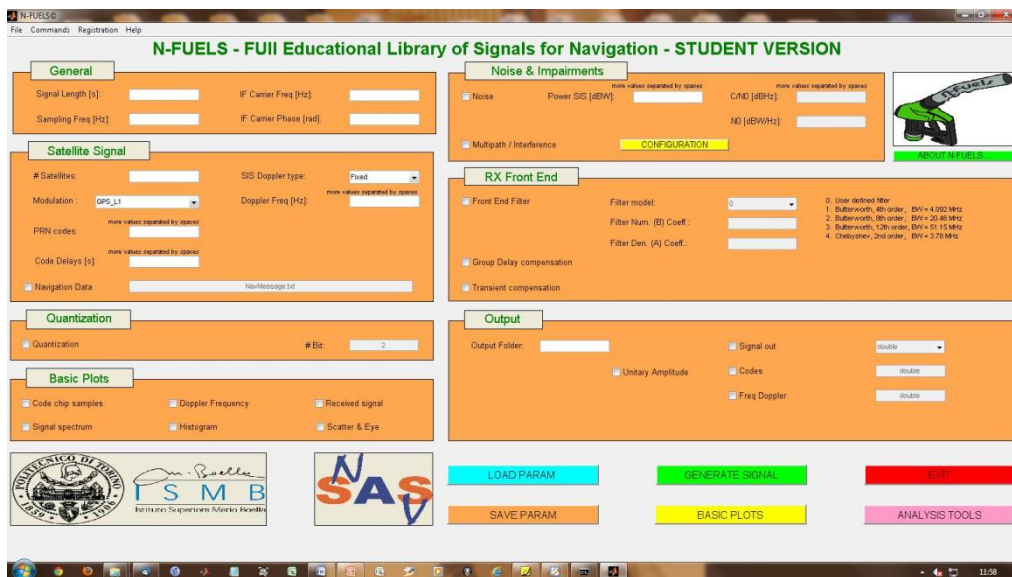


Figura 23. GUI del programa N-FUELS. Obtenida de la referencia [10].

Ambos son programas más completos que el realizado en este proyecto porque además estudian otros sistemas de navegación y permiten emular otros factores como la posible interferencia o el ruido. Sin embargo, ninguno de los dos proporciona acceso al código completo de su programa y su utilización (tras el periodo de prueba) no es gratuita. N-FUELS ofrece una licencia de estudiante pero, con dicha licencia, algunas funcionalidades del programa no están disponibles.



Como conclusión de lo mencionado anteriormente, creo que el programa implementado en este proyecto es imprescindible porque permite ser mejorado e incluso estudiado en un futuro por cualquier persona interesada en el. Además de que este programa ofrece plena libertad en su utilización.

4. Aspectos de Matlab.

Se ha utilizado el lenguaje Matlab para la simulación de todas las señales de navegación del sistema Galileo. Había usado Matlab en asignaturas como Estadística o sistemas lineales, pero llevaba un tiempo sin utilizarlo y he tenido que adaptarme para recordar aspectos concretos de su utilización.

El código usado en este proyecto puede dividirse en dos partes: implementación de los *ranging codes* y la generación de las señales haciendo uso de estos. Como en el documento “*Galileo OS ISIS ICD 2010*” (ver referencia [\[1\]](#)) se proporcionaban los valores iniciales, las secuencias de inicio, los polinomios de tap y los códigos de memoria, se podía obtener una simulación lo más fiable posible al caso real. También fue necesario implementar el comportamiento de los registros LFSR, así como los distintos esquemas de codificación de cada una de las señales.

En cuanto a la generación de las señales de navegación de Galileo hubo una serie de inconvenientes. Dado que matlab es un programa que trabaja con valores numéricos (cada variable es considerada como un vector o una matriz) y no con valores simbólicos fue necesario hacer uso de vectores y matrices. Además al realizar la FFT de una señal, había que crear previamente el eje en frecuencias a usar para la representación de la función resultante; Y en algunos casos, en los que existían valores negativos en el dominio del tiempo, había que usar la función `fftshift()` para obtener una transformada de Fourier de una señal desplazada en el tiempo, evitando que se representara de manera incorrecta en la gráfica. En algunos productos entre matrices era necesario usar la expresión “`.*`” para que la multiplicación entre matrices se realizase elemento a elemento. A veces, algunos vectores fueron rellenados de ceros, para que tuvieran la misma longitud que la señal, de esta manera se evitaba que el tamaño resultante al operar fuese truncado.

Con todo esto, el procedimiento para generar las diferentes señales del sistema Galileo es el siguiente:

- *Ranging codes:*

Al principio, se obtiene la codificación CDMA para cada canal. Dependiendo de cuál sea el canal, se tratará de un código de memoria o un código obtenido a partir de los registros. Una vez que se almacena la secuencia resultante se sobremuestra para que coincida con la frecuencia de muestreo y el ratio de chip. El *ranging code* resultante se repite tantas veces como es necesario para rellenar los bits serán divididos por el código CDMA.

- Flujo de datos:

Dependiendo del tipo de señal, para generar los datos, se hace uso de las funciones `sign()` y `randn()` con el fin de obtener un vector aleatorio de ± 1 . Y en algunos casos específicos, en los que solamente se utiliza un vector de ± 1 , este se define de antemano para obtener una mejor representación de la DSP de la señal en cuestión. Después de todo, la información está sobremuestreada.

- Modulación y multiplexación:

En este punto se genera la señal a partir de la modulación y multiplexación de sus componentes. En la referencia [\[1\]](#) se muestran los diferentes esquemas de modulación y multiplexación de cada señal, así como las indicaciones de cómo deben unirse los canales con los *ranging codes* y las subportadoras. La multiplexación más complicada es la relacionada con la señal E5 porque tiene una expresión más compleja y, dado que la frecuencia de muestreo era la más alta en comparación con el resto de señales, ocupa más memoria.

- Representación:

Finalmente se representan tanto las DSP's como el valor absoluto de las señales de navegación del sistema Galileo. Para ello se usan comandos como plot, subplot, xlabel, ylabel, xlim, ylim, title, etc.

Por último, me gustaría informar que el mayor problema de todos es la memoria necesaria para que el programa funcione adecuadamente. Matlab almacena las variables usadas en cada script, y a veces se son varios vectores o matrices bastante largos a causa de los códigos de memoria y la alta frecuencia de muestreo usada en cada una de las señales, siendo el caso peor el de la señal E5 cuya frecuencia de muestreo es igual a 240 MHz (240 millones de muestras por segundo de una señal). Todo esto puede provocar que el ordenador se quede sin memoria RAM o que tarde un par de minutos para terminar la simulación, cuando todas las figuras aparecen en pantalla. Así que se recomienda cerrar los programas que no se estén usando, para tener la mayor cantidad de RAM disponible.

5. Resultados.

Tras la ejecución del programa diseñado, se obtienen las gráficas de la densidad espectral de potencia, centradas en su frecuencia portadora, de cada una de las señales de navegación que transmitirá el sistema Galileo. También se representan todas ellas en una misma gráfica en función de la potencia con el fin de mostrar la localización de todas las bandas utilizadas por Galileo.

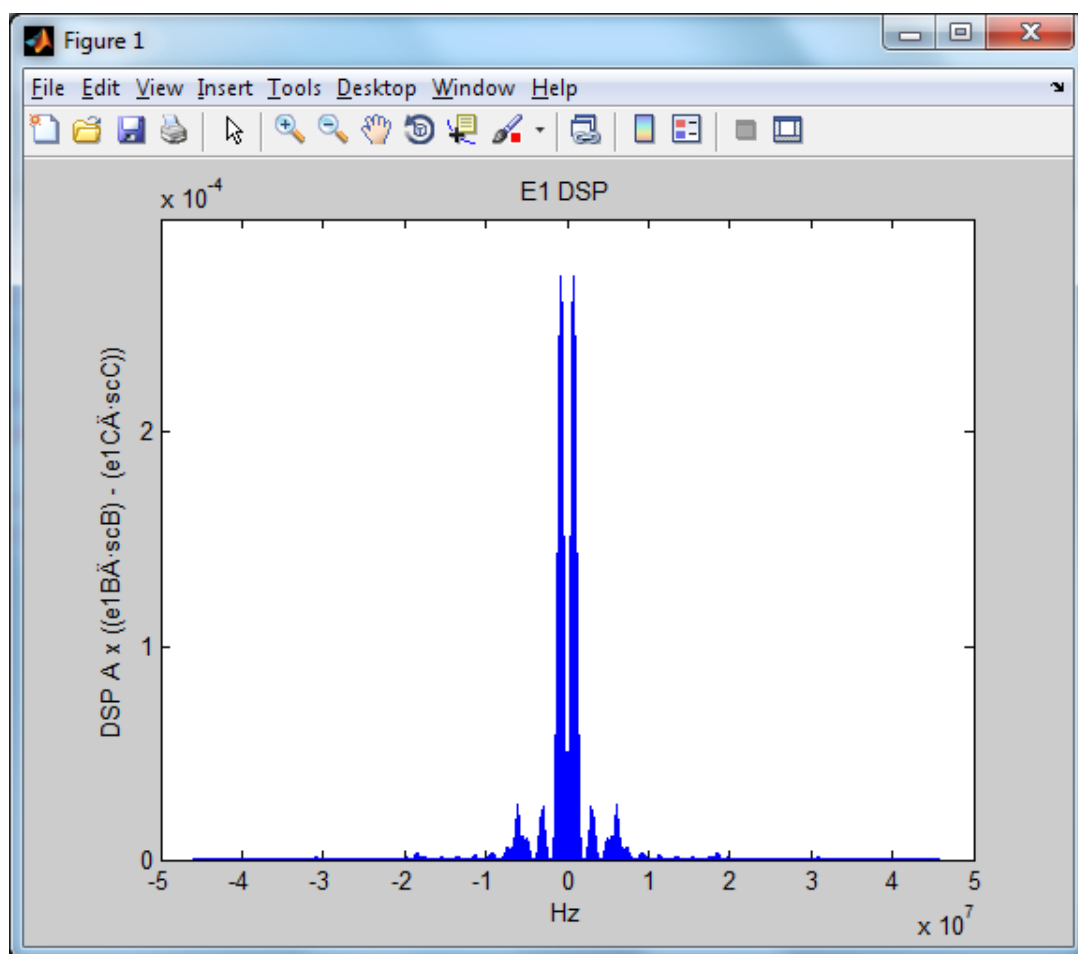


Figura 24. DSP de la señal E1.

En esta figura se representan la DSP en W/Hz de la señal E1. Se trata de la combinación de los canales B y C que componen la señal E1.

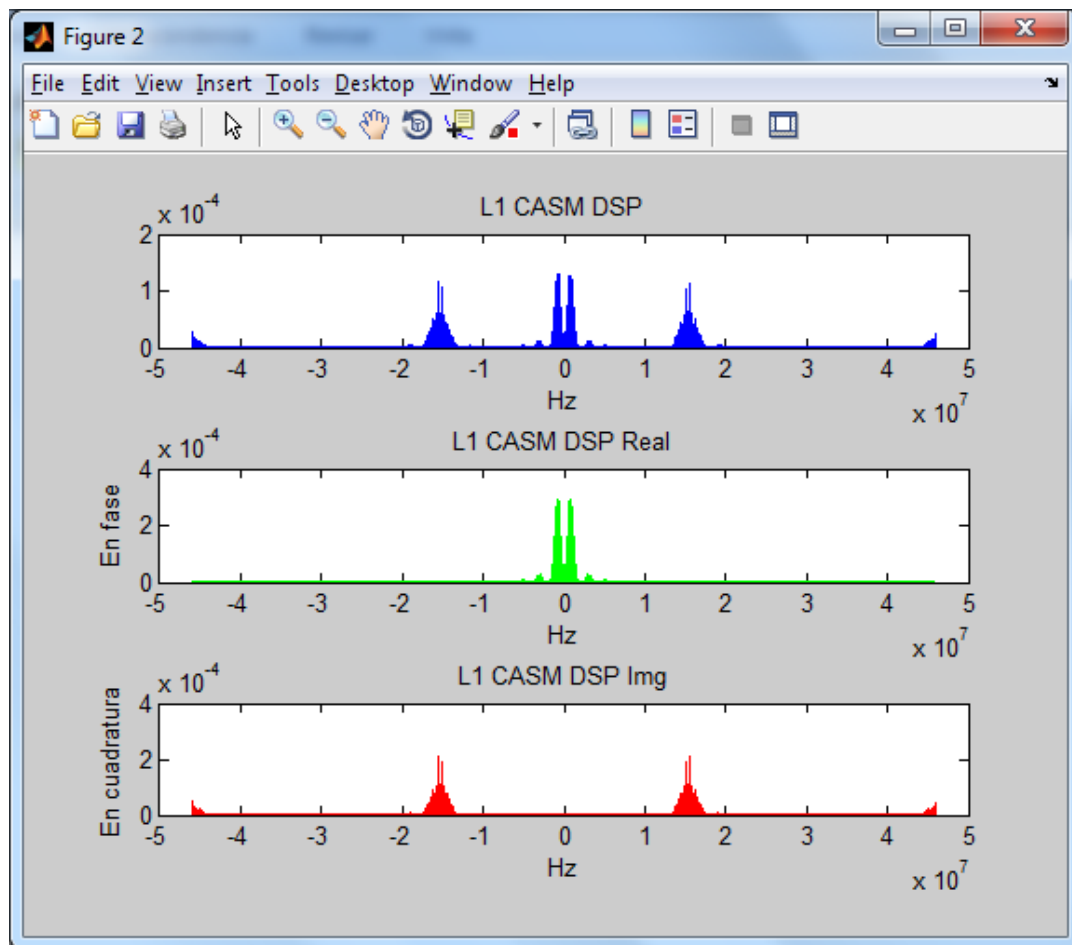


Figura 25. DSP señal L1.

En esta figura se puede observar la DSP en W/Hz de la señal L1. También se muestra la componente en fase (canales de información) y la componente en cuadratura (canales de control) de dicha señal.

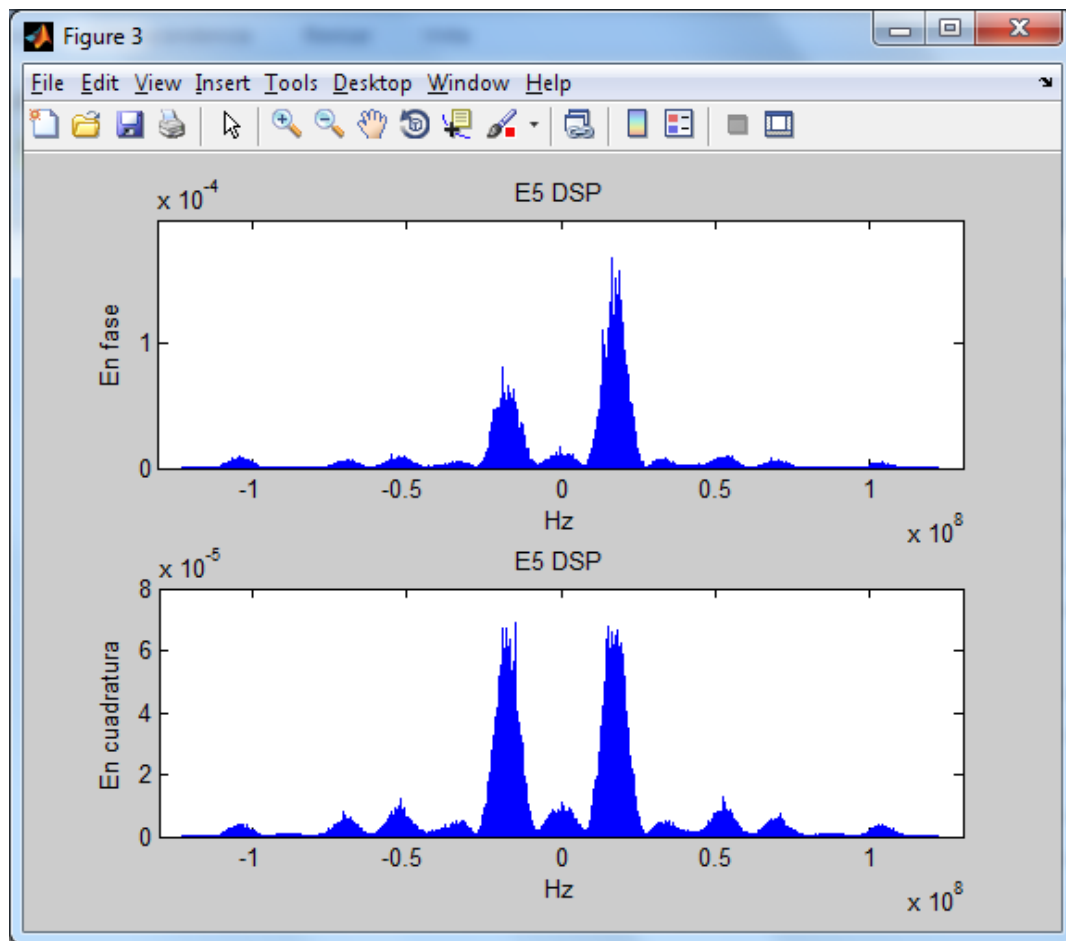


Figura 26. DSP de la señal E5.

En esta figura se representa la DSP en W/Hz de la señal E5. En ella puede observarse la componente en fase (canales de información) y la componente en cuadratura (canales de control) de dicha señal. El lóbulo principal izquierdo, a unos 15 MHz de la frecuencia portadora, corresponde al canal A mientras que el lóbulo principal derecho, a una distancia equivalente con respecto a la frecuencia portadora, corresponde al canal B.

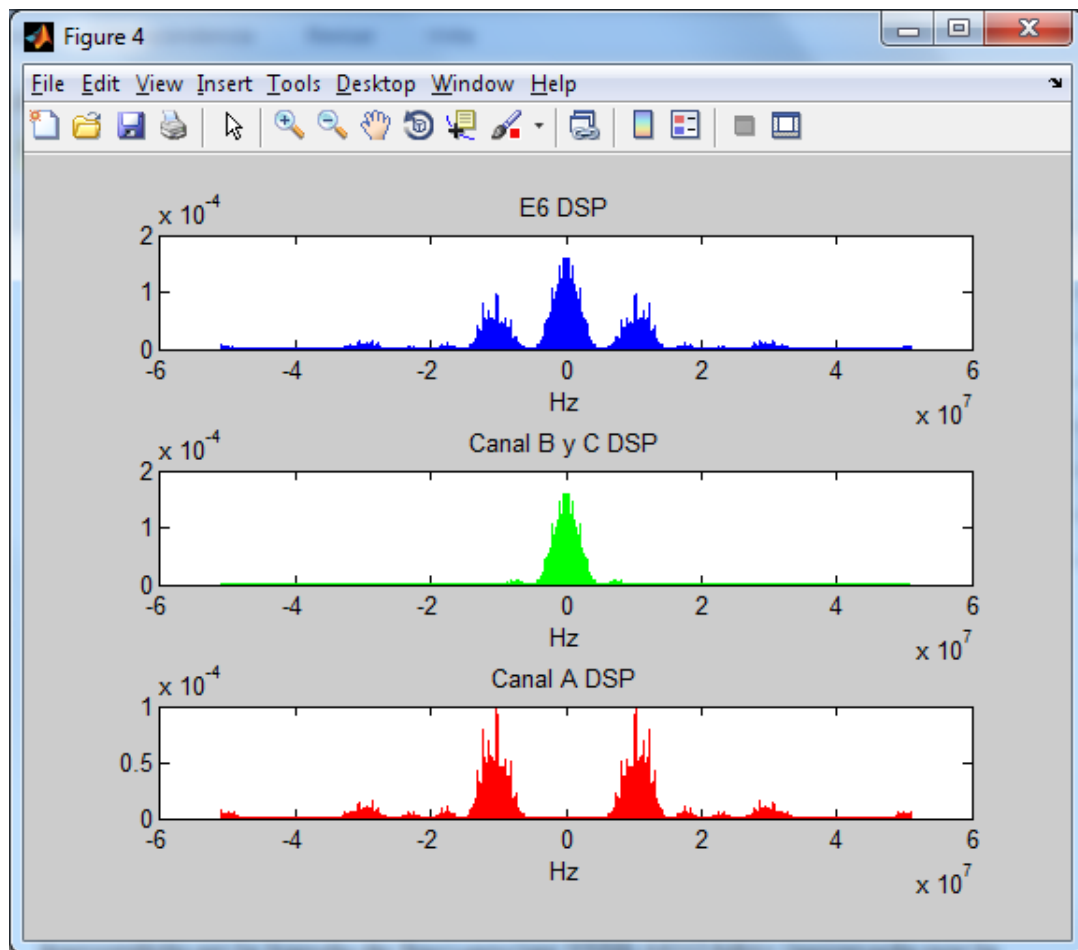


Figura 27. DSP de la señal E6.

En esta figura se muestra la DSP de la señal E6. En ella puede observarse las gráficas de la combinación de los canales B y C, del canal A y la DSP total de la señal.

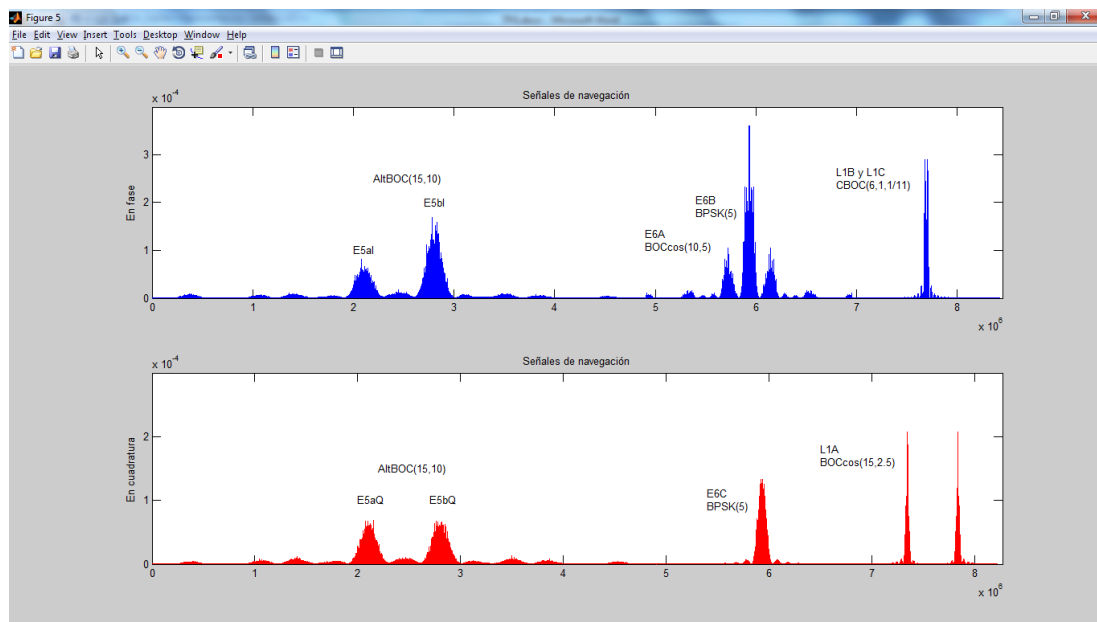


Figura 28. Señales de navegación.

Finalmente en esta última figura se representa la combinación de las DSP de todas las señales del sistema Galileo. En ella se observa la parte real (componente en fase, corresponde a los canales de información) y la parte imaginaria (componente en cuadratura, corresponde a los canales de control) de dichas DSP.

Echando un vistazo a las representaciones de las DSP proporcionadas en la referencia [\[3\]](#), se puede comprobar que tienen una potencia de señal similar (en la referencia se encuentran en dBw/Hz) a las obtenidas en este programa y además, la localización de los lóbulos principales respecto a la frecuencia portadora coincide. Por lo tanto, puede confirmarse que los resultados obtenidos son válidos.

6. Conclusiones.

En este Trabajo Fin de Grado se han cubierto los dos objetivos mencionados al inicio del mismo: por un lado, un estudio del funcionamiento del sistema Galileo y los servicios que proporcionará una vez se encuentre completamente operativo y por otro lado, un programa capaz de simular las diferentes señales de navegación que se transmitirán en el sistema Galileo.

Estos dos puntos me han ayudado a comprender muchas cosas que desconocía del sistema Galileo, como puede ser las modulaciones, la generación de los códigos usados para transmitir las señales y de que se componen estas últimas, además de el hecho de comprobar si el resultado obtenido era correcto mediante la comparación con otras mostradas de manera teórica (ver referencia [\[3\]](#)).

7. Planificación y presupuesto.

7.1. Planificación.

	Nombre de la tarea	Fecha de in	Fecha final	Duración	Antecedores	Asignado a	P4			P1			P2			P3			P4			P1			P2				
							Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun		
1	Sección 1 - Búsqueda de información	20/11/14	05/06/15	198			Sección 1 - Búsqueda de información																						
2	Discriminación de datos	20/11/14	03/06/15	196		Miguel Serna	Discriminación de datos																						
3	Organizar la información	23/11/14	05/06/15	195		Miguel Serna	Organizar la información																						
4	Sección 2 Estudio del Sistema Galileo	07/01/15	21/06/15	166			Sección 2 Estudio del Sistema Galileo																						
5	Dividir la información por apartados	07/01/15	07/01/15	1		Miguel Serna	Dividir la información por apartados																						
6	Redactar la memoria	08/01/15	21/06/15	165	5	Miguel Serna	Redactar la memoria																						
7	Sección 3 Implementación del programa de simulación de las señales	07/02/15	22/05/15	105			Sección 3 Implementación del programa de simulación de las señales																						
8	Generación de los ranging codes	07/02/15	23/02/15	17		Miguel Serna	Generación de los ranging codes																						
9	Modulación y multiplexación	23/02/15	16/04/15	53		Miguel Serna	Modulación y multiplexación																						
10	Representación de las señales	14/04/15	16/05/15	33		Miguel Serna	Representación de las señales																						
11	Validación de los resultados	17/05/15	22/05/15	6	10	Miguel Serna	Validación de los resultados																						
12	Sección 4 Revisiones	24/05/15	21/06/15	29			Sección 4 Revisiones																						
13	1º Entrega parcial	24/05/15	16/06/15	24		Miguel Serna	1º Entrega parcial																						
14	Comentarios	24/05/15	13/06/15	21		Victor Pedro Gil	Comentarios																						
15	Modificaciones	13/06/15	16/06/15	4		Miguel Serna	Modificaciones																						
16	2º Entrega parcial	17/06/15	21/06/15	5		Miguel Serna	2º Entrega parcial																						
17	Comentarios	17/06/15	19/06/15	3		Victor Pedro Gil	Comentarios																						
18	Modificaciones	19/06/15	21/06/15	3		Miguel Serna	Modificaciones																						
19	Entrega definitiva	21/06/15	21/06/15	1		Miguel Serna	Entrega definitiva																						

Tabla 7. Diagrama de Gantt del proyecto.

7.2. Presupuesto.

El presupuesto se compone de los siguientes bloques:

- Costes de personal.
- Costes de equipos.
- Otros costes directos del proyecto.
- Costes indirectos.

7.2.1. Costes de personal.

Categoría	€ / hora	Horas	Coste €
Ingeniero Senior	60	10	600
Ingeniero Junior	30	200	6000
			6600 €

Tabla 8. Costes de personal.

7.2.2. Costes de equipos.

Descripción	Coste €	% Uso dedicado al proyecto	Dedicación meses	Periodo de depreciación	Coste imputable ⁽¹⁾
Ordenador	1210	100 %	8	60	161,3
Licencia MATLAB (Product Family)	2000	100 %	8	60	266,7
					429 €

Tabla 9. Costes de equipos.

(1) Fórmula de cálculo de imputación:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = nº meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.

B = periodo de depreciación (60 meses).

C = coste del equipo (sin IVA).

D = porcentaje del uso que se le dedica al proyecto (habitualmente 100%).

7.2.3. Otros costes directos del proyecto.

Descripción	Empresa	Coste imputable
Material de papelería	Papelería "Angelsol"	15
Copias del proyecto	Imprenta "Martínez"	20
		35 €

Tabla 10. Otros costes directos del proyecto.

7.2.4. Coste total del proyecto.

Asumiendo además de los costes anteriores una tasa de costes indirectos del 20 % el presupuesto total del proyecto desglosado queda como:

Descripción de costes	Cantidad
Costes de personal	6600
Equipos	429
Otros costes directos	35
Costes indirectos	1413
	8477 €

Tabla 11. Coste total del proyecto.

El presupuesto total sería: **8477 €**.

8. Trabajos futuros.

Este proyecto podría ser más completo de cara al futuro si se tiene en cuenta diferentes puntos:

- El estudio del sistema Galileo realizado podría ser más exhaustivo (dado que el objetivo era centrarse en la simulación de las señales siguió únicamente esa línea): elementos físicos del sistema (receptores, conversores, amplificadores, filtros etc.), descripción y explicación del segmento terrestre, espacial, de control y de usuario y la comparación con GPS y GLONASS.
- Un programa que simulase otros factores como la interferencia con otras señales que operen en la misma banda, el ruido, la interferencia ionosférica y multicamino, ofreciendo así una representación más cercana al caso real. También la posibilidad de implementar otras herramientas como los filtros. Incluso la capacidad de representar también las señales de los sistemas GPS y GLONASS, facilitando una comparación de los sistemas gráficamente para un mensaje de navegación dado. Y llegando aun más lejos, se podría desarrollar una interfaz de usuario vistosa y sencilla de usar.

En conclusión, este proyecto aun está abierto a mejoras y en mi opinión la más interesante sería con respecto al programa porque es más entretenido al ser más visual pero que puede llevar mucho más tiempo.

9. Referencias.

[1] Documento de Galileo os sis icd (2010) – Última visita 21/06/15

http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/os-sis-icd/index_en.htm

El documento puede obtenerse desde siguiente enlace:

http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/files/galileo-os-sis-icd-issue1-revision1_en.pdf

[2] Servicios sistema de navegación Galileo – Última visita 21/06/15

http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_services

[3] Planificación de las señales usadas en el sistema Galileo – Última visita 21/06/15

http://www.navipedia.net/index.php/Galileo_Signal_Plan

[4] Modulación BOC – Última visita 21/06/15

[http://www.navipedia.net/index.php/Binary_Offset_Carrier_\(BOC\)](http://www.navipedia.net/index.php/Binary_Offset_Carrier_(BOC))

[5] Modulación CASM – Última visita 21/06/15

http://www.navipedia.net/index.php/Coherent_Adaptive_Sub-Carrier_Modulation_%28CASM%29_and_Interplex

[6] Mensajes de navegación de Galileo – Última visita 21/06/15

<http://galileognss.eu/tag/galileo-navigation-message/>

[7] Modulación BOC – Última visita 21/06/15

<http://what-when-how.com/a-software-defined-gps-and-galileo-receiver/galileo-signal-gps-and-galileo-receiver-part-2/>

[8] Modulación AltBOC – Última visita 21/06/15

[http://www.navipedia.net/index.php/Power Spectral Density of the AltBOC Modulation](http://www.navipedia.net/index.php/Power_Spectral_Density_of_the_AltBOC_Modulation)

[9] Programa SatNav Toolbox – Última visita 21/06/15

<http://gpsoftnav.com/products/satellite-navigation-satnav-toolbox-3-0/>

[10] Programa N-FUELS – Última visita 21/06/15

<http://www.navsas.eu/node/62>

[11] Project Galileo Signal Generation – Última visita 21/06/15

<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7615/1/Project%20Galileo.pdf>